

Bestimmung thermischer Materialkennwerte von Erdkabelbettungen

Genehmigte Dissertation

am Fachbereich Material- und Geowissenschaften und
der Graduate School of Energy Science and Engineering
der Technischen Universität Darmstadt
Hochschulkennziffer D17
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor Ingenieur (Dr.-Ing.)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Graduate School of
**Energy Science
and Engineering**

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Johannes Stegner
geboren in Bad Neustadt

Tag der Einreichung: 4. März 2016
Tag der mündlichen Prüfung: 21. April 2016
Referent: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Ingo Sass
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

Darmstadt, 2016

VORWORT

Ich möchte Prof. Dr. Ingo Sass für die Betreuung dieser Arbeit danken. Er hat mich durch Diskussionen, mittels kritischem Hinterfragen und mit vielen Ratschlägen unterstützt und mir gleichzeitig auch Freiraum für die Bearbeitung und Entwicklung eigener Ansätze gegeben.

Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen vom Fachgebiet Hochspannungstechnik für die Übernahme der Zweitbetreuung. Insbesondere danke ich ihm für die stetige Unterstützung und den Zuspruch.

Weite Teile der Entwicklung und Validierung der vorgestellten Prüfverfahren, wurden durch Industriekooperationen unterstützt. Hierfür danke ich neben vielen anderen besonders der E.ON und der Bayernwerk AG, der APS GmbH (Wille Geotechnik), der HeidelbergCement AG sowie der UMS GmbH. Ebenso danke ich der Graduiertenschule für Energiewissenschaft und Energietechnik an der TU Darmstadt für deren ideelle und materielle Förderung.

Meinen Kollegen Dipl.-Ing. Christoph Drefke, Constantin Balzer, M.Sc. und Markus Schedel, M.Sc. danke ich für die konkrete Hilfe bei zahlreichen Fragestellungen und die stete Diskussionsbereitschaft. Herrn Dipl.-Ing. Arne Buss danke ich für die inhaltliche und orthografische Kontrolle der Arbeit.

Ebenso danke ich allen weiteren Kollegen der Arbeitsgruppe für Tipps und tatkräftige Unterstützung insbesondere: Dipl.-Ing. Philipp Mielke, Dr. Kristian Bär, Dr. Wolfram Rühaak und Simone Roß-Krichbaum. Zudem möchte ich mich herzlich bei den Kollegen Gabriela Schubert und Rainer Seehaus für ihre einfallsreiche und stets gewinnbringende Unterstützung im Labor bedanken.

Ein grundlegendes Element dieser Arbeit waren umfangreiche und zeitintensive Arbeiten im Rahmen von Geländekampagnen und Untersuchungen auf dem Testfeld und im Labor. Für die Unterstützung bei diesen Arbeiten danke ich allen Studierenden, die als Hilfskraft, Bachelor-, Master- oder Diplomstudent dazu beigetragen haben die hier vorgestellten Verfahren zu entwickeln und den Messdatensatz aufzubauen, insbesondere: Duc Tai Nguyen, Mathias Nehler, Sagross Rashidian, Niels Thoma, Susann Holz, Martin Eberhard, Jan Hesse, Thomas Rybak und Kay-Oliver Schubert.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden welche mich während der ganzen Zeit gestützt und motiviert haben. Sie haben zu mir gehalten und mir geholfen eine klare Sicht zu behalten.

Die vorliegende Dissertation bildet den Anfang von momentan vier laufenden und miteinander verknüpften Dissertationen an den Fachgebieten Hochspannungstechnik und Angewandte Geothermie, sowie der Graduate School of Energy Science and Engineering an der TU Darmstadt in Kooperation mit der E.ON und der Bayernwerk AG, sowie der HeidelbergCement AG. In den weiteren Dissertationen erfolgen unter Verwendung und Weiterentwicklung der hier dargestellten Mess- und Auswerteverfahren u. a. die Optimierung von Bettungsbaustoffen, die Quantifizierung des Wärmetransportes in Kabel-Hüllrohrsystemen, die Finite-Elemente-Modellierung des Wasser- und Dampftransportes um erhitzte Erdkabel, sowie eine Quantifizierung der Ausbreitung von Austrocknungshorizonten im Boden um Kabel.

Wesentliche Inhalte der Dissertation wurden gemäß den Vorgaben der Promotionsordnung des Fachbereichs 11, Material- und Geowissenschaften, der Technischen Universität Darmstadt patentiert, veröffentlicht und präsentiert.

Patente

Buss, A., Sass, I. Seehaus, R. Stegner, J. (2010): Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit einer Messprobe. Angemeldet durch die Technische Universität Darmstadt. Deutsches Patentamt: DE 102010036992 A1.

Buss, A., Sass, I. Seehaus, R. Stegner, J. (2011): Method for determining the thermal and temperature conductivity of a sample. Angemeldet durch die Technische Universität Darmstadt. Europäisches Patentamt: EP2607892.

Buss, A., Sass, I. Seehaus, R. Stegner, J. (2011): Method and device for determining thermal conductivity and thermal diffusivity of a measurement sample. Angemeldet durch die Technische Universität Darmstadt. Europäisches Patentamt: EP2603789.

Zeitschriftenartikel und Tagungsbandbeiträge

Drefke, C., Dietrich, J., Stegner, J., Balzer, C., Hinrichsen, V., Sass, I. (2015): Einsatz hochwärmeleitfähiger Verfüllbaustoffe - Steigerung der thermischen Stromtragfähigkeit von Kabel-Hüllrohrsystemen. netzpraxis - Magazin für Energieversorgung. 54(11), 28-34.

Stegner, J., Drefke, C., Sass, I. (2015): New Methods for Determining the Thermophysical and Hydraulic Properties of Unconsolidated Rocks. Proc.: World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.

Drefke, C., Stegner, J., Sass, I. (2015): Influence of the Hydraulic Properties of Unconsolidated Rocks and Backfill Materials on the Change of the Thermophysical Characteristics by Heat Transfer. Proc.: World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.

Balzer, C., Drefke, C., Stegner, J., Hinrichsen, V., Sass, I., Hentschel, K., Dietrich, J. (2015): Improvement of Ampacity Ratings of Medium Voltage Cables in Protection Pipes by Comprehensive Consideration and Selective Improvement of the Heat Transfer Mechanisms within the Pipe. Proc.: 9th International Conference on Insulated Power Cables - Jicable 2015, Versailles, France.

Balzer, C., Drefke, C., Stegner, J., Hinrichsen, V., Sass, I., Hentschel, K., Dietrich, J. (2015): Ampacity Rating of Directly Buried Distribution Cables under the Consideration of Soil Properties to Improve Efficiency of Distribution Networks. Proc.: 23rd International Conference on Electricity Distribution - CIRED 2015, Lyon, Frankreich.

Pei, L., Mielke, P., Rühaak, W., Stegner, J., Homuth, S., Bär, K., Sass, I. (2014): Thermo-Triax. An Apparatus for Petrophysical Properties of Rocks under Simulated Geothermal Reservoir Conditions, Geotechnical Testing Journal, 38(1), 1-20.

Drefke, C., Stegner, J., Sass, I. (2014): Veränderungen der thermischen Eigenschaften teilgesättigter Böden durch den Betrieb geothermischer Anlagen, Heinz-Gerd Röhling & Gernold Zulauf (Hrsg.), Proc.: GeoFrankfurt, Hannover, 85, 528.

Stegner, J., Drefke, C., Janssen, H., Hinrichsen, V., Sass, I. (2014): Einfluss des Wärmetransportverhaltens des umgebenden Bodens auf die betriebsbedingte Aufheizung von Erdkabeln, Heinz-Gerd Röhling & Gernold Zulauf (Hrsg.), Proc.: GeoFrankfurt, Hannover, 85, 543.

Stegner, J.; Drefke, C.; Sass, I. (2014): Heat Transfer Between Buried Cables and the Surrounding Soil. Proc.: 5th European Geothermal PhD Day, Darmstadt.

Stegner, J., Drefke, C., Hentschel, K., Sass, I. (2013): Quantifizierung der Wärmeableitung bei erdverlegten Mittel- und Niederspannungskabeln. BBR-Fachmagazin für Brunnen- und Leitungstiefbau, 64(5), 16-21.

Stegner, J., Drefke, C., Hentschel, K., Sass, I. (2013): Efficiency of buried cables depending on hydrogeological and geothermal properties of trench fill materials. Proc.: European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy.

Drefke, C., Stegner, J., Sass, I. (2013): Changes of thermophysical and hydraulic properties in unsaturated soils caused by heat transfer. Proc.: European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy.

Drefke, C., Stegner, J., Sass, I. (2013): Änderung der thermischen Eigenschaften teilgesättigter Böden im Betrieb geothermischer Anlagen. Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.), Proc.: Der Geothermiekongress 2013, Essen.

Pei, L., Mikisek, P., Stegner, J., Sass, I. (2013): Auswirkung der Temperatur auf die Entwicklung der Durchlässigkeit von Sandstein. Proc.: GeoTHERM 2013, Offenburg, 41.

Sass, I., Stegner, J. (2012): Coupled Measurements of Thermophysical and Hydraulic Properties of Unsaturated and Unconsolidated Rocks. Proc.: 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, CA, SGP-TR-194.

Stegner, J., Freise, M., Homuth, S., Mikisek, P., Pei, L., Rühaak, W. (2012): Auswirkungen von Druck und Temperatur auf die Permeabilität und Kompressibilität von Fels. Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.). Proc.: Der Geothermiekongress 2012. Karlsruhe.

Stegner, J., Freise, M., Homuth, S., Mikisek, P., Pei, L., Rühaak, W., Sass, I., Tazl, M., Wille, T. (2012): Hochtemperatur Felstriaxial- und Permeabilitätsprüfanlage für aggressive Fluide. Proc.: FH-DGG Jahrestagung 2012, Dresden.

Stegner, J., Rashidian, S., Maurer, H., Sass, I. (2012): Einflüsse der Mineralogie und Rheologie von Hinterfüllmaterialien auf deren mechanische und thermophysikalische Eigenschaften, Proc.: GeoTHERM 2012, Offenburg, 49.

Huber, H., Arslan, U., Stegner, J., Sass, I. (2011): Experimental and numerical modelling of geothermal energy transport, Proc.: 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG 2011), Melbourne, Australia, 1, 455-459.

Huber, H., Arslan, U., Stegner, J., Sass, I. (2011): Inaccuracies in geothermal field tests, Proc.: International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011), Perth, Australia.

Drefke, C., Stegner, J., Sass, I. (2011): Untersuchung der thermischen und hydraulischen Eigenschaften von ungesättigten Lockergesteinen. Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.), Proc.: Der Geothermiekongress 2011, Bochum, CD-ROM.

Stegner, J., Rashidian, S., Maurer, H., Sass, I. (2011): Untersuchung der thermophysikalischen Eigenschaften von Hinterfüllmaterialien. Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.), Proc.: Der Geothermiekongress 2011, Bochum, CD-ROM.

Huber, H., Arslan, U., Stegner, J., Sass, I. (2011): Experimentelle Untersuchungen zum Wärmetransportverhalten oberflächennaher durchströmter Böden. Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.), Proc.: Der Geothermiekongress 2011, Bochum, CD-ROM.

Stegner, J., Nguyen, D., Seehaus, R., Sass, I. (2011): Entwicklung eines Wärme- und Temperaturleitfähigkeitsmessgerätes für Lockergesteine. Proc.: 18. Tagung für Ingenieurgeologie - Forum für junge Ingenieurgeologen, Berlin, 373.

Stegner, J., Sass, I. (2010): Korrelation der Saugspannungs-/Sättigungskurve mit der Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinen. Proc.: GeoDarmstadt 2010, Darmstadt, 531-532.

Stegner, J., Sass, I. (2010): Korrelation von bodenmechanischen und geothermischen Parametern von Lockergesteinen. Bundesverband Geothermie e.V. (Hrsg.), Proc.: Der Geothermiekongress 2010, Karlsruhe, CD-ROM.

Stegner, J. (2010): Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Kapillarspannung. Proc.: 31. Baugrundtagung - Forum für junge Geotechnik-Ingenieure. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Hildesheim, München, 181-185.

Projektberichte

Sass, I., Hinrichsen, V., Stegner, J., Drefke, C., Balzer, C. (2015): Heat Dissipation of Underground Cables - Quantifizierung des Einflusses des Wasserhaushalts, der Umwelttemperatur und der geothermischen Kennwerte auf die Wärmeableitung erdverlegter Mittel- und Niederspannungskabel. Abschlussbericht Projektphase 1, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Sass, I., Stegner, J., Drefke, C. (2014): Quantifizierung des Einflusses des Wasserhaushalts, der Umwelttemperatur und der geothermischen Kennwerte auf die Wärmeableitung erdverlegter Mittel- und Niederspannungskabel. Jahresbericht 2013, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Stegner, J., Drefke, C., Nehler, M. (2013): Effect of thermophysical and hydraulic properties of trench fill materials on warming-up of buried cables. In Technische Universität Darmstadt (Hrsg.), Faculty of Materials and Geo Sciences - Annual Report 2012, 179-181.

Sass, I., Stegner, J., Drefke, C. (2013): Quantifizierung des Einflusses des Wasserhaushalts, der Umwelttemperatur und der geothermischen Kennwerte auf die Wärmeableitung erdverlegter Mittel- und Niederspannungskabel. Jahresbericht 2012, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Sass, I., Stegner, J., Drefke, C. (2013): Heat Dissipation of Underground Cables. Annual Report 2012, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Sass, I., Stegner, J. (2010): Entwicklung eines Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes für Lockergesteine. Abschlussbericht, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Poster ohne Tagungsbandbeiträge

Schubert, K.-O., Stegner, J., Drefke, C., Sass, I. (2014): Anwendung von Enhanced Geothermal Response Testmethoden zur Bestimmung der betriebsbedingten Aufheizung von Erdkabeln. Der Geothermiekongress 2014, Essen.

Stegner, J., Drefke, C., Hentschel, K., Janssen, H., Hinrichsen, V., Sass, I. (2014): Bewertung und Optimierung der Erwärmung und Strombelastbarkeit von erdverlegten Mittel- und Niederspannungskabeln. Leben 3.0 – Treffpunkt Zukunft, Frankfurt a. M..

Stegner, J., Drefke, C., Hentschel, K., Janssen, H., Hinrichsen, V., Sass, I. (2014): Messung und Optimierung der Erwärmung und Strombelastbarkeit von erdverlegten Mittel- und Niederspannungskabelnetzen. 6. Darmstädter Energiekonferenz, Darmstadt.

Stegner, J., Sass, I. (2010): Korrelation von bodenmechanischen und geothermischen Parametern von Lockergesteinen. Der Geothermiekongress 2010, Karlsruhe.

KURZFASSUNG

Die Funktion der elektrischen Energienetze ist weltweit wichtig für die Bevölkerung und Wirtschaft der Länder. Beim Bau und beim Netzbetrieb stellen die Versorgungssicherheit sowie ökologische und ökonomische Sachverhalte die wichtigsten Aspekte dar. In Schwellenländern erfolgt z. B. zurzeit ein Aus- und Umbau zur Vermeidung von Netzüberlastungen aufgrund der wachsenden Industrie und Veränderungen in der Bevölkerungsstruktur. In Industrienationen und insbesondere in Deutschland als Vorreiter der Energiewende ist der Bau von Hoch- und Höchstspannungstrassen zum Transport der Energie aus großen Windparks notwendig. Zusätzlich müssen für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Kleinkraftwerken und der damit einhergehenden Dezentralisierung der elektrischen Energieproduktion umfangreiche Umbauten in den heute überwiegend mit erdverlegten Kabeln realisierten Verteilnetzen durchgeführt werden.

Zurzeit erfolgen in Deutschland zeitweise Abschaltungen von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien aufgrund fehlender Netzkapazitäten (ECOFYS, 2012). Diese Abschaltungen sind u. a. auch deshalb notwendig, weil es bei im Boden verlegten Stromkabeln zu elektrischen Verlusten kommt, die in Form von Wärme abgegeben werden. Die maximale Strombelastung wird durch die maximal zulässigen Leitertemperaturen beschränkt, die von den Kabelherstellern mit 70 bis 90 °C angegeben werden.

Die Strombelastbarkeiten von Erdkabeln werden durch die Normen IEC 60287 und die DIN VDE 0276-1000 vorgegeben. Beim Nachweis von mittleren und geringen Wärmewiderständen der Kabelumgebung bieten sie die Möglichkeit, erhöhte Werte als Bemessungsstrom für die Kabel anzusetzen. Die Wärmetransportmechanismen in Böden sind neben dem Einfluss der mineralischen und organischen Bestandteile sowie der Temperatur eng mit dem Wassergehalt verknüpft. Der Wassergehalt wiederum hängt maßgeblich von der Saugspannung im Boden ab. Die Verknüpfung zwischen dieser und dem Wassergehalt von Lockergesteinen bildet die sogenannte Wasserspannungskurve.

Bisher werden die Möglichkeiten zur Bewertung der Kabelbelastbarkeit anhand von Bodenkennwerten in der Praxis nahezu nicht genutzt, weil keine standardisierten Messmethoden und Auswerteverfahren für die Wärmeleitfähigkeiten von Erdkabelbettungen existieren. In der vorliegenden Arbeit wurden deswegen Methoden für die Ermittlung der bodenphysikalischen Kennwerte für die thermische Belastbarkeit von erdverlegten Kabelsystemen entwickelt und validiert, und es wird deren Anwendung dargestellt. Die theoretischen Ansätze dieser Arbeit wurden durch umfangreiche Labor- und Felduntersuchungen begleitet und validiert.

Die Grundlagen des Wärmetransports um Erdkabel herum wurden aus den Fachbereichen Elektrotechnik und Geowissenschaften zusammengetragen. Dazu wurden die Kennwerte für die Untersuchung unterschiedlicher Erdkabelbettungen (offshore, onshore, Sonderbauformen) ermittelt und Entnahme-, Lagerungs- und Transportkonzepte erstmals abgeleitet. Aus der Geothermie bekannte Messverfahren wurden auf die kombinierte Messung von thermischen und hydraulischen Kennwerten von ungesättigten und gesättigten Kabelbettungen übertragen und weiterentwickelt.

Ein klassischer Verdunstungsversuch wurde mit einer Wärmeleitfähigkeitsmessung mittels Nadelsonden kombiniert. Mit dieser methodischen Weiterentwicklung kann die Wärmeleitfähigkeit einer Bodenprobe direkt über einen weiten Wassergehalts- und Saugspannungsbereich bestimmt werden, während das Wasser aus der Probe verdunstet. Zudem wurde ein neues Verfahren für die Überführung der einzelnen Messwerte in eine stetige Funktion abgeleitet.

Das Versorgungsgebiet des Projektpartners, der E.ON AG, umfasst erhebliche Anteile Bayerns. Deshalb wurden insbesondere bayerische Böden, sowie zu Vergleichszwecken Seeböden der Nord- und Ostsee untersucht. Da erdverlegte Kabel häufig auch in künstliche Bettungsbaustoffe eingebaut werden, wurden Rohstoffe für Bettungsbaustoffe ebenso untersucht. Die Mess- und Auswerteverfahren wurden auch hier angewendet und validiert. Mittels statistischer Betrachtungen der Messergebnisse konnte das Potenzial der geothermischen Voruntersuchung von Verlegetrassen für die Berechnung der Kabelbelastbarkeit aufgezeigt werden. Bei den bayerischen Böden ergaben sich für 14 % der untersuchten Proben Wärmeleitfähigkeiten, die unter $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ liegen. Für diese Böden ist der oft bei Bemessungen der Übertragungsleistung nach DIN 0276-1000 angesetzte Bemessungswert von $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ zu groß gewählt. Mit üblichen Bodenverdichtungsarbeiten im Bereich der Kabelgräben werden dagegen Wärmeleitfähigkeiten von mehr als $1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ leicht erreicht. Dieses konnte für mindestens 50 % der Böden gezeigt werden. Damit kann für Kabel in diesen Böden eine erhöhte Belastbarkeit nach DIN 0276-1000 für die Verteilung elektrischer Energie angesetzt werden.

Es wird gezeigt, dass eine Identifizierung von Böden mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten ebenso wie die Identifizierung von Böden mit hohen Wärmeleitfähigkeiten während des Trassenbaus möglich ist. Damit können Böden mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten gezielt ausgetauscht werden. Die Messergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in einer hierfür erstellten GIS-Karte erfasst. Sie bildet mit den Messwerten der folgenden Projektabschnitte die Basis für die Entwicklung einer räumlichen Bewertungsmethode zur Planung von Kabeltrassen, welche den Einfluss des Energie- und Wasserhaushalts der Standorte berücksichtigt.

Zur Validierung wurden die Labormesswerte in einem hierfür errichteten Kabeltestfeld mit Feldmesswerten verglichen. Hierfür wurden Temperaturzeitreihen an Mittel- und Niederspannungskabeln mittels Software, die in der Geothermie für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens um Erdwärmesonden eingesetzt wird, ausgewertet. Es zeigen sich gute Übereinstimmungen zwischen den Feld- und Labormesswerten. Bei den Feldmesswerten ist aufgrund der Kabeltemperaturen ein zusätzlicher konvektiver Wärmetransport im Porenraum über die Dampfphase erkennbar. Das dargestellte Auswertungsverfahren stellt eine Möglichkeit dar, bei neugebauten Trassen durch Anbringung von Temperatursensoren bzw. Lichtwellenleitern über eine Aufheizung des Kabels die Kennwerte des umgebenden Bodens zu ermitteln und zusätzlich Trassenbereiche mit besonders hoher Wärmeentwicklung zu identifizieren und möglicherweise zu sanieren.

Auf Basis der im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen wurde abschließend ein neues Messgerät entwickelt, dass die bisherigen Messverfahren ergänzt. Hierin erfolgt die Messung unter Variation der Verdichtung und der Temperaturgradienten in der Probe, wodurch der Dampftransport in der Probe miterfasst wird.

ABSTRACT

The proper functioning of its power grid is an infrastructural key factor for every country, economy and population worldwide. Security of energy supplies and other ecological and economic issues are the main aspects in building and operating a power grid. Emerging economies are currently extending and remodeling their infrastructure to prevent over-stressing the grids due to the demands of a growing industry and changes in their population structure. In industrial nations - especially in Germany, the pioneer of the „Energiewende“ - the construction of high voltage lines to transport energy from large wind farms has become a necessity. To make use of alternative sources of energy in small power plants and due to the decentralization of power production that comes along with it, extensive remodeling of the grid has to be done. At the time being distribution networks consist mainly of buried power lines.

Facilities that make use of renewable energies currently have to shut down intermittently because of lacking grid capacities (ECOFYS,2012). These shut downs arise from various reasons - including the one that buried power lines suffer losses that are emitted as heat. The maximum current load is limited by the maximum temperature of the conductor, which is specified by the power line manufacturers as 70 to 90° Celsius.

The maximum current load of buried lines is specified by the IEC 60287 and DIN VDE 0276-1000. These standards offer the possibility to raise the maximum current for used cables, if medium to low thermal resistance of the cable surroundings can be proved. The mechanisms of heat transport in soils are, among the influence of mineral and organic constituents and their temperature, tightly coupled to their water content. The water content in turn significantly depends on the ground's capillary tension. Joining the capillary tension with the specific water content of unconsolidated rocks results in the so-called water retention curve.

Until now, the possibilities of rating the capacity of power lines based on soil properties are rarely used, because no standardized methods of measuring and evaluating thermal conductivity of underground cable beddings exist. This project succeeded in developing and evaluating methods for determining geophysical properties of underground power line systems and depicting exemplary application. The theoretical approach was validated by comprehensive laboratory and field studies.

Basic principles of heat transmission have been compiled from the work of the departments of electrical engineering and geosciences. For that purpose, properties of different cable beddings (offshore, onshore, special forms) were analyzed and concepts of extraction,

storage and transportation of samples were deduced for the first time. Known geothermal energy-measurement processes have been adopted and advanced for the combined measurement of thermal and hydraulic properties of unsaturated and saturated cable beddings.

A classic evaporation experiment has been combined with a thermal conductivity measurement with needle probes. This methodological advance made it possible to determine the thermal conductivity of a soil sample over a wide range of water content and capillary tension while the water evaporates from the sample. Furthermore, a new method for transforming single test results in a continuous function has been developed.

The supply area of the project partner E.ON AG covers large parts of Bavaria. Therefore especially Bavarian soil was examined, as well as submarine ground of the North Sea and the Baltic Sea for control purposes. Since underground power lines are often bedded in synthetic building materials, they have been analyzed as well. The developed measurement and evaluation procedures were also successfully applied here. Statistical analysis of the measurement results proved the potential of geothermal examination in the forefront of the calculation of the maximum current loads of buried cable lines. For Bavarian soils 14 % of the samples showed a thermal conductivity below $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. For these soils, the often-used maximum current load according to DIN 0276 1000 of $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ is too high. With usual soil compaction procedures in the area of the cable trenches, a thermal conductivity of more than $1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ could be reached. This was proven for over 50% of the examined soils. Therefore for buried power lines in these soils, a raised power rating according to DIN 0276 1000 can be assumed for the distribution of electrical energy.

It was shown that the identification of soils with low thermal conductivity, as well as soils with high thermal conductivity during construction of underground power grids is possible. Soils with low thermal conductivity could be exchanged accordingly. The measurement results of the project have been recorded as a GIS map for presentation. Together with the results of the project phases described in the following, it forms the basis for the development of a spatial rating procedure for planning cable routes, which incorporates the influence of local environmental constraints.

In order to validate laboratory results, they have been compared to results from a therefore erected cable-testbed in the field. Temperature-time sequences for medium and low voltage cables have been examined with a software that is used in geothermal energy studies for the calculation of thermal conductivity of soil around geothermal energy probes. Good correlation between results from the laboratory and the field was found. Measurements from the testbed showed additional convective heat transport via steam through the pores.

The described rating procedure offers a possibility to identify the surrounding soil's parameters when constructing new underground power routes with the help of temperature sensors and optical fiber. Identifying areas with unusually high heat emissions for renovation is another philosophy of use.

As described above, a new measuring device that supplements the existing devices was developed based on the findings of this. The device makes use of varying compaction of the soil sample and its temperature gradient and the steam movement.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	3
2	Theoretische Grundlagen.....	5
2.1	Erdkabel im deutschen Stromnetz.....	5
2.2	Kabelaufbau.....	6
2.2.1	Mittelspannungskabel	6
2.2.2	Niederspannungskabel.....	9
2.3	Verluste bei der Übertragung elektrischer Energie in Kabeln.....	10
2.3.1	Leiterverluste	10
2.3.2	Schirm, Mantel- und Bewehrungsverluste	11
2.3.3	Verluste im Dielektrikum.....	12
2.3.4	Quantifizierung der Verluste.....	12
2.4	Grundlagen des Wärmetransports.....	13
2.4.1	Konduktion, Konvektion und Latentwärmtransport	13
2.4.2	Linienquellentheorie	15
2.5	Kennwerte von Lockergesteinen	17
2.6	Wasserverteilung und Potenzialkonzept.....	18
2.6.1	Teilpotenziale.....	19
2.6.2	Wasserspannungskurve.....	21
2.6.3	Permeabilität und hydraulische Leitfähigkeit.....	27
2.7	Natürliche Einflüsse auf die Bodentemperatur.....	29
3	Stand der Forschung und Technik	31
3.1	Berechnung der Kabelbelastbarkeit von Energiekabeln	31
3.1.1	Spiegelungsmethode	32
3.1.2	Anwendung der DIN VDE 0276.....	36
3.2	Thermische Bodenuntersuchung.....	39
3.2.1	Linienquellenverfahren	39
3.2.2	Divided-Bar-Verfahren.....	41
3.2.3	Thermoscanner	43
3.3	Anwendung von Berechnungsmodellen	44
3.3.1	Wärmeleitung in Zwei-Komponenten/Phasen-Gemischen.....	46
3.3.2	Wärmetransport in Drei-Phasen-Systemen	48
4	Methodik der Beprobung.....	54
4.1	Beurteilung der Kennwerte	54
4.1.1	Offshore-Energiekabel	54

4.1.2 Onshore-Energiekabel	55
4.1.3 Sonderbauformen	56
4.2 Probenentnahme und -behandlung	57
4.2.1 Einordnung von Proben.....	57
4.2.2 Vorgehensweise im Feld	58
5 Entwickelte Messverfahren für die Wärmeleitfähigkeit mit Nadelsonden	63
5.1 Messverfahren für wassergesättigte Proben.....	63
5.2 Säulenversuch	66
5.3 Anpassungsfunktion für die Messwerte	69
5.4 Verdunstungsversuch.....	71
5.5 Messunsicherheiten	75
6 Untersuchungen von Böden und Werkstoffen	76
6.1 Untersuchung gesättigter Proben	76
6.2 Rohstoffe für Bettungsbaustoffe	79
6.2.1 Voruntersuchungen.....	79
6.2.2 Rohstoffuntersuchungen	80
6.3 Teilgesättigte Untersuchungen von bayerischen Böden	81
6.3.1 Sande, Lehme und Tone.....	83
6.3.2 Anmoorige Böden und Moorböden.....	90
6.3.3 Weitere Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit.....	96
6.3.4 Wärmekapazitäten bayerischer Böden.....	97
6.3.5 Bewertung für den Trassenbau	101
7 Überprüfung von Messwerten im Kabelbetrieb.....	105
7.1 Erdkabeltestfeld	105
7.1.1 Hydrogeologische Bedingungen.....	107
7.1.2 Messwerte der Testfeldeböden	109
7.1.3 Validierung der Testfeldbedingungen	111
7.2 Bestimmung von Bodenkennwerten aus Kabelaufheizungen	115
7.2.1 Versuchsreihen an Mittel- und Niederspannungskabeln.....	116
7.2.2 Vergleich von Labor- und Feldmesswerten	120
8 Entwickeltes Messgerät für die Wärmeleitfähigkeit von Kabelbettungen	121
8.1 Analyse von Geräten und Verfahren	121
8.2 Verdichtungs- und temperaturgradientengesteuertes Messverfahren.....	124
8.2.1 Messverfahren und Aufbau des Gerätes	124
8.2.2 Temperierung und Kalibrierung der Temperatursensoren	129
8.2.3 Vergleichsplatte.....	131
8.2.4 Messunsicherheiten	140

8.2.5 Versuchsdurchführung	142
8.2.6 Validierung	144
8.2.7 Feuchteverteilung in der Probe aufgrund von Temperaturgradienten	147
9 Zusammenfassung und Ausblick.....	149
9.1 Zusammenfassung.....	149
9.2 Ausblick.....	152
Symbolverzeichnis.....	153
Abbildungsverzeichnis	156
Tabellenverzeichnis	160
Literaturverzeichnis	161
Erklärung zur Dissertation nach §9 PromO	175
Lebenslauf.....	176
Anhang 1: Kabelbelastbarkeit nach DIN VDE 0276	177
Anhang 2: Natürliche Lagerungsdichte der Böden	178
Anhang 3: Kennwerte von Kabelaufbauelementen	181
Anhang 4: Arten von Kabeldehnungen im Boden	183

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation

Die Funktion der elektrischen Energienetze ist weltweit wichtig für die Bevölkerung und Wirtschaft der Länder. Beim Bau und beim Netzbetrieb stellen die Versorgungssicherheit sowie ökologische und ökonomische Sachverhalte die wichtigsten Aspekte dar. In Schwellenländern erfolgt z. B. zurzeit ein Aus- und Umbau zur Vermeidung von Netzüberlastungen aufgrund der wachsenden Industrie und Veränderungen in der Bevölkerungsstruktur. In Industrienationen und insbesondere in Deutschland als Vorreiter der Energiewende ist der Bau von Hoch- und Höchstspannungstrassen zum Transport der Energie aus großen Windparks notwendig. Diese können jedoch nicht über die vollständige Strecke als Freileitungen ausgeführt werden, sondern müssen z. B. in Ballungsgebieten immer wieder durch Kabelstrecken unterbrochen werden. Zusätzlich müssen für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen in Kleinkraftwerken und der damit einhergehenden Dezentralisierung der elektrischen Energieproduktion umfangreiche Umbauten in den heute überwiegend mit erdverlegten Kabeln realisierten Verteilnetzen durchgeführt werden.

Nach der gesetzlichen Festlegung nach § 5 EEG (2014) müssen Anlagen erneuerbarer Energien unverzüglich von den Netzbetreibern an ihr Netz angeschlossen werden und das Netz entsprechend ausgebaut werden. Hieraus resultiert ein Ausbau- und Netzverstärkungsbedarf.

Die Deutsche Energie-Agentur errechnete, dass für die Erfüllung des Netzentwicklungsplanes der Bundesregierung bis 2030 neben dem Bau von 3.600 km Hoch- und Höchstspannungstrassen von Nord- nach Süddeutschland der Neubau von rund 135.000 km und der Umbau von 21.000 km regionaler und kommunaler Stromtrassen notwendig wird (dena, 2012). Netzknoten, die bisher Energieabnehmer waren, werden zum Teil zu Einspeisepunkten, und momentan herrschende Leistungsflussrichtungen können sich dabei in Trassenabschnitten zeitweise oder dauerhaft umkehren.

Nach einer Studie des Beratungsunternehmens ECOFYS konnten aufgrund fehlender Netzkapazität in 2011 mindestens 212 Gigawattstunden Energie und 2012 mindestens 407 Gigawattstunden Energie aufgrund fehlender Netzkapazitäten nicht ins Netz eingespeist werden (ECOFYS, 2012). Diese Menge hätte 2012 ausgereicht, um 116.000 Haushalte das ganze Jahr mit elektrischer Leistung zu versorgen.

Die Abschaltungen sind u. a. auch deshalb notwendig, weil es bei im Boden verlegten Stromkabeln aufgrund der ohmschen Widerstände der Kupfer- oder Aluminiumleiter zu

elektrischen Verlusten, die in Form von Wärme abgegeben werden, kommt. Die maximale Strombelastung und damit Auslastung der Kabel wird durch die maximal zulässigen Leitertemperaturen beschränkt, die von den Kabelherstellern mit 70 bis 90 °C angegeben werden. Durch eine Überschreitung der zulässigen Leitertemperaturen kann es zu einer geringeren Nutzlebensdauer der Kabeltrasse und zu vermehrten Störungen und damit ggf. zu einer geringeren Versorgungssicherheit kommen. Trassenschäden erfordern Eingriffe, die wiederum weitere Störungen an anderen erdverlegten Sparten verursachen können.

Für die Bewertung und Entscheidung über Art und Umfang der erforderlichen Baumaßnahmen ist die Strombelastbarkeit der Kabel, die die IEC 60287 und die DIN VDE 0276-1000 vorgeben, entscheidend. Die Normen geben Richtwerte für die Belastbarkeit von Erdkabeln unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren vor. Beim Nachweis von mittleren und geringen Wärmewiderständen der Kabelumgebung bietet sie die Möglichkeit, erhöhte Werte als Bemessungsstrom für die Kabel anzusetzen. In diesen Normen werden die Veränderungen der thermophysikalischen Bodeneigenschaften und Bodenwassergehalte sowie deren Wechselwirkungen in der Verlegetiefe von 0,6 bis 0,8 m unter der Geländeoberkante und bodenartabhängige thermophysikalische und hydraulische Eigenschaften bisher nur rudimentär berücksichtigt. Beim Nachweis von mittleren und geringen Wärmewiderständen der Kabelumgebung bieten sie die Möglichkeit, erhöhte Werte als Bemessungsstrom für die Kabel anzusetzen.

Zudem bringt die genauere Kenntnis der Wärmeflüsse im Boden um Kabel in Bezug auf Seekabel Vorteile für den Umweltschutz. Der Meeresboden darf in 20 cm Tiefe oberhalb von Seekabeln nach Vorgaben des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) nicht um mehr als zwei Kelvin erwärmt werden. Nach dieser Regel ist „auf Basis des derzeitigen Wissenstandes mit hinreichender Wahrscheinlichkeit sichergestellt, dass erhebliche negative Auswirkungen der Kabelerwärmung auf die Natur bzw. die benthische Lebensgemeinschaft vermieden werden“ (Merck, 2006).

Bisher werden die Möglichkeiten zur Bewertung der Kabelbelastbarkeit anhand von Bodenkennwerten in der Praxis nahezu nicht genutzt, weil keine standardisierten Messmethoden und Auswerteverfahren für die Wärmeleitfähigkeiten von Erdkabelbettungen existieren.

In Trinks (2010) wird Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb erdverlegter Energiekabel an zwei Standorten in Berlin untersucht und mittels Finite-Elemente-Simulationen nachvollzogen. Folgende Forderungen werden aus der Arbeit abgeleitet:

„Aus der Arbeit leiten sich weitere Aufgaben der Boden- und Standortkunde im Bereich der Energiekabel ab, die einen wichtigen Beitrag für den zukünftigen Ausbau des Kabelnetzes darstellen:

- Entwicklung einer räumlichen Bewertungsmethode zur Planung von Kabeltrassen, welche den Einfluss des Energie- und Wasserhaushalts von natürlichen und urbanen Standorten berücksichtigt.
- Entwicklung eines Verfahrens zur kombinierten Messung von thermischen und hydraulischen Eigenschaften und Ableitung von „technischen Pedotransferfunktionen“.
- Implementierung weiterer energietechnischer Modellvorstellungen in das numerische Simulationsmodell, um z. B. die stromlastabhängige Wärmeproduktion des Energiekabels, in Wechselwirkung mit den thermischen Bedingungen im Kabelraum, zu berücksichtigen.

Diese Aufgaben erfordern eine stärkere Zusammenarbeit der Standort- und Bodenkunde mit technischen Disziplinen und rücken das Aufgabenspektrum weiter in Richtung der Ingenieurwissenschaften.“

1.2 Zielsetzung

In dieser Arbeit sollen die Grundlagen des Wärmetransports um Erdkabel aus den Fachbereichen Elektrotechnik und Geowissenschaften zusammengetragen werden. Die Kennwerte für die Untersuchung unterschiedlicher Erdkabelbettungen (offshore, onshore, Sonderbauformen) sollen ermittelt und Entnahme-, Lagerungs- und Transportkonzepte abgeleitet werden. Aus der Geothermie bekannte Messverfahren sollen auf die kombinierte Messung von thermischen und hydraulischen Kennwerten von ungesättigten und gesättigten Kabelbettungen übertragen und weiterentwickelt werden.

Es sollen aus dem Versorgungsgebiet des Projektpartners, der E.ON AG, in Bayern flächendeckend Proben entnommen und untersucht werden. Mittels statistischer Betrachtungen der Messergebnisse soll das Potenzial der geothermischen Voruntersuchung von Verlegetrassen für die Berechnung der Kabelbelastbarkeit ermittelt werden.

Die Messergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen in einer hierfür erstellten GIS-Karte erfasst werden. Sie bilden dann mit den Messwerten der folgenden Projektabschnitte die Basis für die Entwicklung einer räumlichen Bewertungsmethode zur Planung von Kabeltrassen, welche den Einfluss des Energie- und Wasserhaushalts der Standorte berücksichtigt.

Zur Validierung sollen die Labormesswerte in einem hierfür errichteten Kabeltestfeld für Mittel- und Niederspannungskabel mit Feldmesswerten verglichen werden. Hierfür werden Temperaturzeitreihen an Mittel- und Niederspannungskabeln mittels Software, die in der Geothermie für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens um Erdwärmesonden eingesetzt wird, ausgewertet.

Auf Basis der im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen soll abschließend ein neues Messgerät entwickelt werden, dass die bisherigen Messverfahren ergänzt und speziell auf die Anforderungen zur Messung von Erdkabelbettungen abgestimmt ist.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Erdkabel im deutschen Stromnetz

Das deutsche Stromnetz besitzt einen hierarchischen Aufbau. Es ist in 4 Hauptnetzebenen untergliedert und hat eine Länge von 1.780.000 km (Abbildung 2.1). Davon sind 71 % erdverlegt. Die Höchstspannungsebene dient dem Transport der elektrischen Energie von großen Offshore-Windparks oder Kraftwerken im Transportnetz. Durch die Erhöhung der Spannungen verringert sich bei gleicher Leistung die Stromstärke, aus der sich die Verluste im Wesentlichen ergeben. Die darunterliegende Hochspannungsebene hat Transport- und Verteilfunktion. Reine Verteilfunktion kam bisher den Mittelspannungsebene und Niederspannungsebene zu. Aufgrund der zunehmenden Einspeisung von dezentralen Energiequellen in diese Ebenen verändert sich deren Funktion sehr stark, und immer öfter müssen sie auch Transportaufgaben übernehmen.

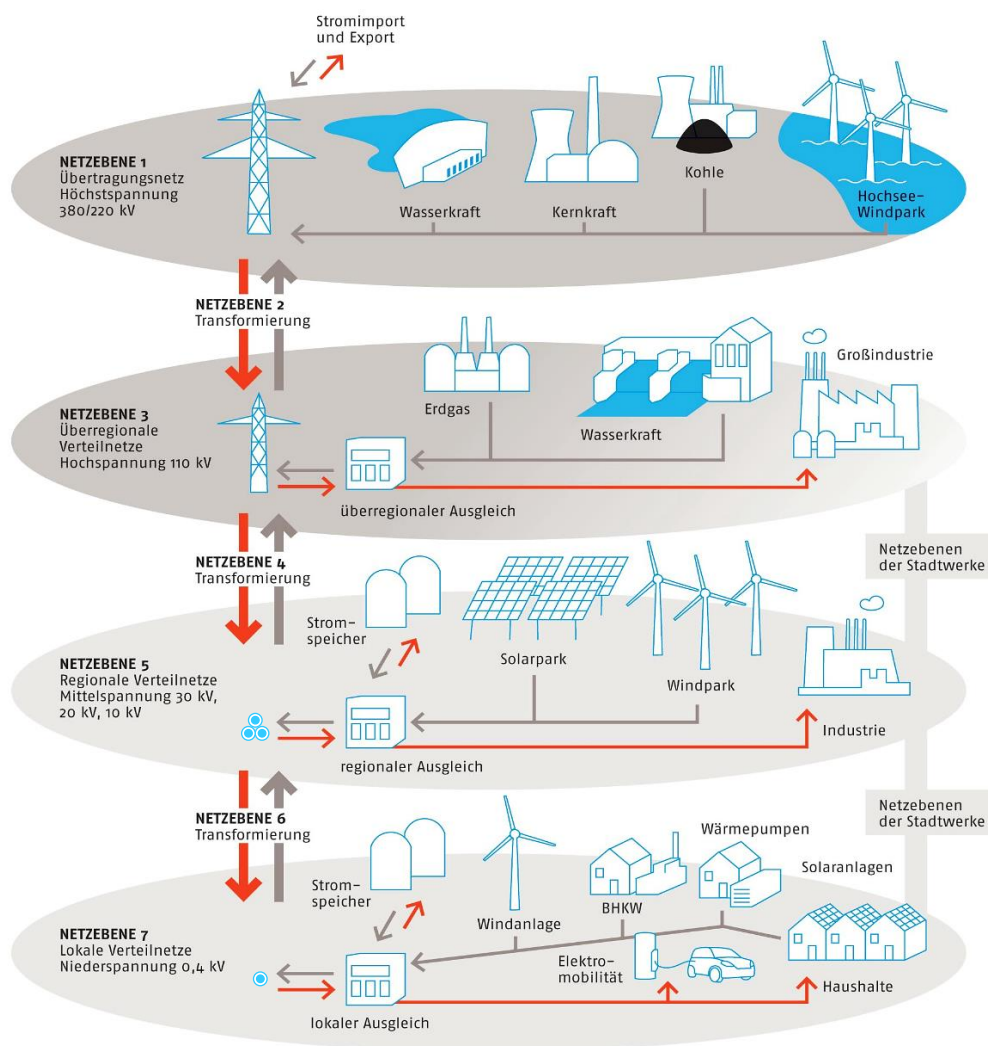


Abbildung 2.1: Aufbau des deutschen Stromnetzes (verändert nach VKU, 2012)

In Tabelle 2.1 sind die Anteile und die Verteilung von Freileitungen und Erdkabeln in Deutschland auf die verschiedenen Spannungsbereiche dargestellt. Der Höchst- und Hochspannungsenergietransport wird größtenteils über Freileitungen durchgeführt.

Der Transport elektrischer Energie von Offshore-Anlagen an das Festland geschieht in allen Spannungsebenen ausschließlich über Kabel. Freileitungen werden hier nicht eingesetzt. Ebenso sind die ursprünglichen Verteilnetze der Mittel- und Niederspannungsebenen zum größten Teil als Kabel ausgeführt. Die Spannungsebenen mit hohen Kabelanteilen sind in Tabelle 2.1 grau markiert.

Tabelle 2.1: Anteile von Freileitungen und Erdkabeln in deutschen Stromnetzen (Daten: Deutsche Umwelthilfe e.V., 2013; BDEW, 2010)

Spannungsebene	2008			2012		
	Freileitung	Erdkabel	Anteil Erdkabel	Freileitung	Erdkabel	Anteil Erdkabel
	in km	in km	in %	in km	in km	in %
Höchstspannung Onshore	35.607	102	0,3	34.876	185	0,5
Hochspannung Onshore	71.207	5.739	8	72.336	7.098	9
Hochspannung Offshore	keine Daten		100	keine Daten		100
Mittelspannung	130.595	376.174	74	113.248	400.174	78
Niederspannung	144.704	986.476	87	130.224	1.037.000	89
Insgesamt	382.113	1.368.491	78	350.684	1.444.457	80

2.2 Kabelaufbau

Kabel müssen so konzipiert sein, dass sie neben dem Leiten hoher elektrischer Ströme eine verlustarme Übertragung gewährleisten und die Isolationen den jeweiligen Betriebs- und Überspannungen zum Boden und den verschiedensten Umwelteinflüssen standhalten (Küchler, 2009). Zur Gewährleistung von Sicherheit und Zuverlässigkeit der Kabel sind die Merkmale und Anforderungen an die Produktion der Kabelgarnituren und die Prüfungen der Kabel in der DIN VDE 0276-603 und der DIN VDE 0276-620 festgelegt. In der Mittel- und Hochspannungsebene sind kunststoffisolierte, einadrige Kupfer- oder Aluminiumkabel verbreitet.

2.2.1 Mittelspannungskabel

Der Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Mittelspannungskabel ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Je nach Anforderung und Beanspruchung des Kabels unterscheiden

sich die Aufbauelemente in den verwendeten Werkstoffen und den unterschiedlichen Konstruktionen (Heinhold & Stubbe, 2009). Die im Testfeld (siehe Abschnitt 7.1) eingebauten Mittelspannungskabel NA2XS(F)2Y 1x150 RE/25 sind für maximale Leitertemperaturen von 90 °C zugelassen, was einer Manteltemperatur von 70 °C entspricht.

Die Aufbauelemente des Kabels können aus dem Typkurzkennzeichen ermittelt werden. Darin enthalten ist das Bauartkurzzeichen, die Aderzahl, der Nennquerschnitt in mm², das Kurzzeichen für die Leiterform und -art, falls vorhanden der Nennquerschnitt des Schirms oder des konzentrischen Leiters in mm² und ggfs. die Nennspannungen in kV:

N	Kabel nach Norm
A	Aluminiumleiter
2X	Isolierung aus vernetztem Polyethylen (VPE)
S	Schirm aus Kupfer
(F)	Schirmbereich längswasserdicht
2Y	Außenmantel aus hochdichtem Polyethylen (PE-HD)
1	Anzahl der Adern
150	Adernquerschnitt in mm ²
RE	eindrätiger Leiter, kreisförmiger Querschnitt in mm ²
25	Nennquerschnitt des Schirms in mm ²

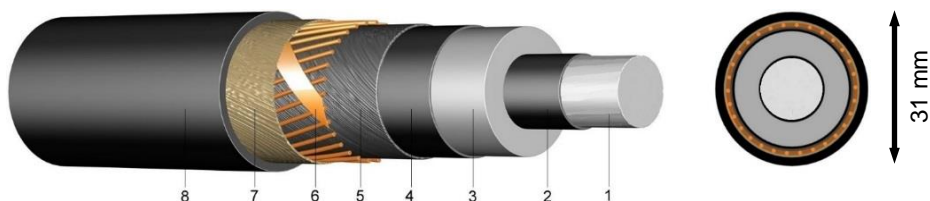


Abbildung 2.2: Mittelspannungskabel NA2XS(F)2Y 1x150 RE/25 (verändert nach allkabel s.r.o., 2014)

Der *Innenleiter* (1) zur Stromübertragung besteht aus einem oder mehreren Aluminium- oder Kupferdrähten. Die Einzeldrähte bilden in ihrer Summe den Leiterquerschnitt. Dieser wird bei metallenen Leitern nicht als geometrischer, sondern als elektrisch wirksamer Querschnitt angegeben, welcher durch Messung des elektrischen Widerstandes, bzw. des Gewichtes ermittelt wird.

Die *Isolierung* (3) zum Schutz vor Spannungsüberschlag (Lichtbogen zwischen den elektrischen Leitern benachbarter Kabel) besteht meist aus Polymeren. Sie werden eingesetzt, weil sie eine vergleichsweise schnelle und saubere Montage, geringes Gewicht, hohe Belastbarkeiten und niedrige stromabhängige und dielektrische Verluste kombinieren. Für

Mittel- und Hochspannungskabel wird bei Neuinstallationen vernetztes Polyethylen (VPE) verwendet. Dieses zeichnet sich durch geringe dielektrische Verluste und hohe elektrische Isolationsfähigkeit und Temperaturstabilität aus. Es ist in Kabeln einer Nennspannung bis zu 500 kV einsetzbar (Küchler, 2009).

In der Umgebung von elektrisch geladenen Körpern existieren elektrische Felder. Sie sind die Ursache für die Feldkraft, die diese Körper auf andere geladene Körper ausüben. Zudem können Ableit-, Lade- und Fehlerströme auftreten. Ein Ableitstrom ist ein elektrischer Strom, der unter üblichen Betriebsbedingungen in einem unerwünschten Strompfad fließt. Lade- und Fehlerströme können auftreten, weil der Aufbau kunststoffisolierter Mittelspannungskabel einem Kondensator entspricht. Der Wert der Kapazität des Kabels hängt insgesamt von der Konstruktion des Kabels ab (Leiterdurchmesser, Isolationsmaterial, etc.). Die Distanz der Leiter gegeneinander und gegen Erde ist bei Freileitungen größer als bei Erdkabeln. Dies führt dazu, dass die Kapazitätswerte von Freileitungen gegenüber den Kapazitätswerten von erdverlegten Kabeln nahezu vernachlässigbar gering sind. Diese Kabelkapazitäten wirken sich wie folgt aus: Im Normalbetrieb fließt pro Kilometer Kabellänge bei der Wechselspannungsübertragung (abhängig von Kabelkonstruktion und Betriebsspannung) ein kapazitiver Ladestrom. Dieser Ladestrom überlagert sich dem normalen Laststrom, der in der Regel induktiven Charakter hat. Der kapazitive Ladestrom ist deshalb in der Regel vernachlässigbar und wird erst relevant, wenn ein weit ausgedehntes Kabelnetz besteht und der Laststrom gering und nahezu ohmsch ist. Im Erdschluss-Fall (nicht beabsichtigte elektrisch leitfähige Verbindung zum Erdpotenzial) führen die Kabelkapazitäten dazu, dass an der Fehlerstelle ein Fehlerstrom mit kapazitivem Charakter fließt (Bastian et al., 2012).

Durch die innere (2) und die äußere Leitschicht (4) und die darauffolgende Polsterschicht (5) verursacht, wird das elektrische Feld in der Isolierung homogenisiert. Dies sorgt für eine gleichmäßige dielektrische Belastung des Isolierwerkstoffes, was lokale Feldüberhöhungen, die Teilentladungen verursachen können, verhindert (Küchler, 2009).

Die Isolierung wird von einem Kupferschirm (6) umschlossen. Dieser dient zur Ableitung störender Erdschlussströme, die infolge eines Isolationsfehlers gegen Erde fließen, und schirmt das elektrische Feld des Leiters ab. Eine Trennschicht (7) bildet den feuchtigkeitsdichten Abschluss des Kabels nach außen. Als äußerste Schicht schützt ein Kunststoffmantel (8) das Kabel vor mechanischen oder chemischen Einflüssen. Diese Aufbauelemente bilden die Schutzhülle des Kabels (Heinhold & Stubbe, 1999).

2.2.2 Niederspannungskabel

Der Aufbau des in der Arbeit verwendeten Niederspannungskabels NAY2Y-J SE 4x150 (Abbildung 2.3) ist in der DIN VDE 0276-603 geregelt.

Die maximal zulässige Leiter- und Manteltemperatur beträgt 70 °C. Es besteht aus vier massiven im Querschnitt sektorförmigen Aluminiumleitern (1), die jeweils einzeln mit einer Polyvinylchlorid-Isolationsschicht (2) ummantelt sind. Der gelb-grün ummantelte Aluminiumleiter dient als Schutz- und Neutralleiter. Um dieses Viererbündel ist ein gemeinsamer PVC-Füllmantel (3) angebracht. Eine elektrische Schirmung ist für die einzelnen Leiter im Gegensatz zum Mittelspannungskabel aufgrund der geringeren Gefahr des Spannungsüberschlags nicht zwingend notwendig. Trotzdem können auch Niederspannungskabel mit einem äußeren Schirm aus Kupfer ausgeführt sein (Oeding & Oswald, 2011). Die Isolierungen (2 und 3) dienen auch dem Schutz gegen Eindringen von Wasser. Der Außenmantel aus hochdichtem Polyethylen (PE-HD) (4) bildet eine Armierung und dient dem Schutz vor physischer und chemischer Belastung des Kabels.

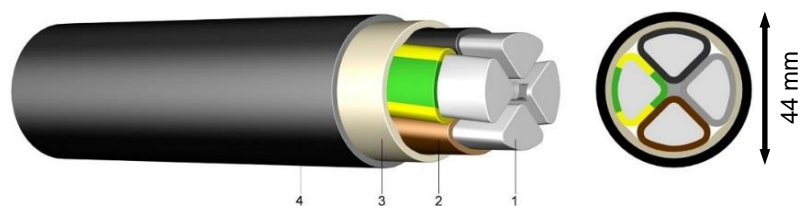


Abbildung 2.3: Niederspannungskabel NAY2Y-J SE 4x150 (allkabel s.r.o., 2014)

N	Kabel nach Norm
A	Aluminiumleiter
Y	Isolierung aus Polyvinylchlorid (PVC)
2Y	Außenmantel aus hochdichtem Polyethylen (PE-HD)
J	Kabel mit grün-gelber Ader
SE	eindrätiger, sektorförmiger Querschnitt
4	Anzahl der Adern
150	Adernquerschnitt in mm ²

2.3 Verluste bei der Übertragung elektrischer Energie in Kabeln

Beim Transport elektrischer Energie entstehen Verluste, die in Form von Wärme abgegeben werden. Grundsätzlich können diese Wärmeverluste eines Kabels entsprechend dem Punkt an dem sie auftreten in Leiter-, Dielektrikums-, Mantel-, und Bewehrungsverluste unterschieden werden (Heinhold & Stubbe, 1999). Im Betrieb von Mittel- und Niederspannungskabeln entsprechend Abschnitt 2.2 ergeben sich nach Balzer & Hinrichsen (2015a) die folgenden Verluste.

2.3.1 Leiterverluste

2.3.1.1 Gleichstromwiderstand des Leiters

Hauptbestandteil des Wärmeverlustes eines Kabels bildet die im Leiter verursachte ohmsche Verlustleistung nach Gleichung (2.1).

$$P'_{V,L} = R'_L \cdot I_{\text{eff}}^2 \quad (2.1)$$

Wobei R'_L den Leiterwiderstandsbelag und I_{eff} den Effektivwert des in diesem Leiter geführten Stroms beschreibt.

Als Widerstandsbelag wird der Widerstand eines Körpers bezogen auf die Längeneinheit bezeichnet. Der Leiterwiderstandsbelag setzt sich aus einem sogenannten Gleichstromwiderstandsbelag $R'_{L,=}$, der von den Leitereigenschaften und der Temperatur abhängt und einem Wechselstromwiderstandsbelag $R'_{L,\sim}$, der die frequenzabhängigen Zusatzverluste durch zeitlich veränderbare Größen beschreibt, zusammen.

Der Gleichstromwiderstandsbelag bei 20 °C lässt sich nach Gleichung (2.2) als Produkt eines Widerstandsbelages, der allein von der Geometrie und dem Material des Leiters abhängig ist, sowie der spezifischen elektrischen Resistivität ϱ , des Leiters, ausdrücken.

$$R'_{L,=20^\circ\text{C}} = \varrho \cdot \frac{1}{A_L} \quad (2.2)$$

Die elektrische Resistivität ϱ_A von Aluminium beträgt $2,650 \cdot 10^{-2} \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$ und diejenige von Kupfer, ϱ_K , beträgt $1,678 \cdot 10^{-2} \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$ (Haynes, 2010).

Die DIN EN 60228 erlaubt die Verwendung von Legierungen als Leitermaterial, weswegen die realen Gleichstromwiderstandsbeläge der Kabelleiter in der Regel über den nach Gleichung 2.2 berechneten liegen. Die Norm gibt Grenzwerte vor, um die die Gleichstromwiderstandsbeläge überschritten werden dürfen. Im Falle der in Abschnitt 2.21 und 2.2.2 beschriebenen Mittel- und Niederspannungskabel mit 150 mm² Aluminiumleiterquerschnitt darf die Überschreitung 16,5 % betragen.

Der Widerstandsbelag des Leiters in Abhängigkeit der Leitertemperatur T_L errechnet sich nach der IEC 60287-1-1 entsprechend Gleichung (2.3). Hierfür wird in der Norm der lineare Korrekturfaktor α eingeführt.

$$R'_{L,=} = R'_{L,=20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 + \alpha(T_L - 20^{\circ}\text{C})] \quad (2.3)$$

Der Korrekturfaktor für Aluminium α_A beträgt $4,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, und der Korrekturfaktor für Kupfer α_K beträgt $3,39 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Eine Erhöhung der Leitertemperatur von 0 auf 90 °C hat damit eine Erhöhung des spezifischen Widerstandes eines Aluminiumleiters von 36,3 % und eines Kupferleiters von 30,5 % zur Folge.

Zusätzlich zu den Verlusten, die durch den Gleichstromwiderstand hervorgerufen werden, treten beim Betrieb des Kabelsystems mit Wechselstrom Verluste auf, die durch die Spannungs- beziehungsweise Strominduktionen zeitlich veränderlicher Felder hervorgerufen werden.

2.3.1.2 Skineffekt im Innenleiter

Ein Skineffekt im Innenleiter entsteht dadurch, dass der durch den Leiter fließende Wechselstrom ein magnetisches Wechselfeld in und um diesen Leiter verursacht. Hierdurch werden Wirbelströme induziert, die sich mit dem Strom im Leiter überlagern. Die Stromdichte nimmt durch diesen Effekt zur Leitermittellachse hin ab. Dadurch verringert sich die für den Widerstand wirksame Fläche, was eine Widerstandserhöhung des Leiters zur Folge hat. Diese Widerstandserhöhung ist nur vom Kabelaufbau, der Leitfähigkeit und der Betriebsfrequenz abhängig (Küchler, 2009).

2.3.1.3 Proximityeffekt im Innenleiter

Ein Proximityeffekt im Innenleiter wird u. a. durch die Anordnung der Kabel verursacht. Dabei wird ein Leiter vom magnetischen Wechselfeld eines benachbarten Leiters beeinflusst, indem dieser ebenfalls Wirbelströme induziert, die zu einer einseitigen Stromverdrängung führen (Heinhold & Stubbe, 1999). Dies verringert die für den Widerstand wirksame Fläche und bewirkt eine Widerstandserhöhung des Leiters.

2.3.2 Schirm, Mantel- und Bewehrungsverluste

Weiterhin entstehen Verluste im Kabelschirm, -mantel und der -bewehrung, da einadrig ausgeführte Mittelspannungskabel immer einen Schirm besitzen, der zum einen der Homogenisierung des elektrischen Feldes in der Isolierung dient zum anderen im Fehlerfall den Kurzschlussstrom führen muss. Im ungestörten Betrieb bilden sich durch die magnetische Kopplung mit anderen Leitern und Schirmen Ströme in diesen aus, die ihrerseits Verluste bewirken.

2.3.3 Verluste im Dielektrikum

Neben den Leiterverlusten treten Wirkleistungsverluste in der Isolierung auf. Die sogenannten dielektrischen Verluste entstehen durch die periodische Orientierung von Dipolen im elektrischen Wechselfeld. Im Gegensatz zu den vorher dargestellten Verlusten sind diese nicht proportional zum Strom, sondern zum Quadrat der Spannung, und deswegen nur bei hohen Spannungen relevant (Lücking, 1981).

2.3.4 Quantifizierung der Verluste

Eine tabellarische Aufstellung der Verluste für unterschiedliche Temperaturen und Belastungen für die in Abschnitt 2.2 dargestellten Mittel- und Niederspannungskabel ist in Balzer & Hinrichsen (2015a) dargestellt. Hiernach ergeben sich bei der Bestromung mit Bemessungsstrom und einer Leitertemperatur von 60 °C im Mittelspannungskabel Verluste aufgrund des Gleichstromwiderstandes des Leiters von 24,34 Wm⁻¹. Aufgrund von Skin- und Proximityeffekten im Mittelspannungskabel ergeben sich Erhöhungen des Leiterverlustes von 2,3 ‰ und 1,1 ‰. Die Zusatzverluste durch den Mantel belaufen sich auf 2,68 % des Leiterverlustes, und die Verluste im Dielektrikum betragen 0,23 ‰ der Leiterverluste bei einer Spannung von 20 kV. Hieraus kann abgeleitet werden, dass der Gleichstromwiderstand des Leiters für die maßgebenden Verluste verantwortlich ist und die anderen Verlustarten nahezu vernachlässigbar sind.

Bei Mittelspannungskabeln mit größerem Leiterquerschnitt, wie z. B. 400 mm² Kupferkabeln, erhöhen sich die Mantelverluste auf 13,29 % der Leiterverluste, was eine Berücksichtigung erforderlich macht.

Die Verluste im Niederspannungskabel beschränken sich alleine auf die Leiterverluste. Zum einen ist kein Mantel vorhanden, der Zusatzverluste verursacht, zum anderen sind die dielektrischen Verluste aufgrund der niedrigen Spannung vernachlässigbar. Bei einer Leitertemperatur von 60 °C im Niederspannungskabel beträgt der Verlust durch den Gleichstromwiderstand des Leiters 18,09 Wm⁻¹. Die Erhöhung des Verlustes verursacht durch Skineffekte im Leiter ist vernachlässigbar, und die Erhöhung des Verlustes aufgrund von Proximityeffekten beträgt 4,4 ‰ nach IEC 60287-1-1. Deswegen ist es ausreichend, bei diesem Kabeltyp ausschließlich die Verluste durch den ohmschen Widerstand des Leiters zu betrachten (Balzer & Hinrichsen, 2015a).

2.4 Grundlagen des Wärmetransports

2.4.1 Konduktion, Konvektion und Latentwärmehtransport

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dem Energieerhaltungssatz, entspricht die Änderung der inneren Energie dU in einem geschlossenen und ruhenden System der Änderung der Wärme ∂Q und der Arbeit ∂W nach Gleichung (2.4).

$$dU = \partial Q + \partial W \quad (2.4)$$

Die Temperatur selbst beschreibt den jeweils vorhandenen Zustand. Die Wärmeenergie Q kann über die Systemgrenzen transportiert werden. Dabei kommt es zu Temperaturänderungen oder zu Änderungen im Aggregatzustand von Stoffen im System. Der Wärmestrom \dot{Q} stellt nach Gleichung (2.5) dabei die pro Zeiteinheit transportierte Wärmeenergie dar.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (2.5)$$

Die Wärmestromdichte \dot{q} ist nach Gleichung (2.6) der Wärmestrom pro Flächeneinheit.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{Q}{tA} \quad (2.6)$$

Die Ableitung des Energieerhaltungssatzes liefert nach Gleichung (2.7) die Leistungsbilanz eines Systems. Diese berechnet sich aus der Leistungsdichte der im System enthaltenen Wärmequellen und Senken \dot{W} und den ein- und ausgehenden Wärmeströmen.

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} \quad (2.7)$$

Die Temperaturänderung pro Zeiteinheit aufgrund einer Änderung der inneren Energie in einem Kontrollvolumen V wird mittels Gleichung (2.8) bestimmt. Hierbei wird die volumetrische Wärmekapazität c_V des Kontrollvolumens nach Gleichung (2.14) verwendet.

$$\frac{dU}{dt} = \int_V c_V \frac{dT}{dt} dV \quad (2.8)$$

Der Wärmestrom \dot{Q} kann aus der in das System einfließenden Wärmestromdichte \dot{q} entlang eines Normalenvektors \vec{n} durch Bilden des Integrals über die Fläche berechnet werden. Dieses Integral über die Fläche des Kontrollvolumens entspricht nach dem Gaußschen Integralsatz dem Volumenintegral der Divergenz der Wärmestromdichte entsprechend Gleichung (2.9).

$$\dot{Q} = - \int_A \dot{q} \vec{n} dA = - \int_V \operatorname{div}(\dot{q}) dV \quad (2.9)$$

Integrieren von Gleichung (2.9) und (2.8) über das Kontrollvolumen und Einsetzen der Gleichungen in Gleichung (2.7) ergibt die Änderungen der Temperatur innerhalb eines Kontrollvolumens in Abhängigkeit der ein- und ausfließenden Wärmeströme und der inneren Wärmequellen und Senken.

Drei Wärmetransportmechanismen lösen Wärmeströme aus. Dies sind Konduktion, Konvektion und Strahlung (VDI-GVC (Hrsg.), 2013). Bei der Untersuchung des Wärmehaushaltes von Böden oder Bettungen ist es nach Bachmann (1997) ausreichend, die Wärmeleitung im Korngerüst und Bodenwasser (Konduktion), den Transport fühlbarer Wärme durch beispielsweise den Zustrom von Niederschlägen oder Grundwasser und den Transport latenter Wärme im Wasserdampf (Konvektion) zu betrachten. Der dritte Transportmechanismus von Wärme über Strahlung spielt demnach beim Transport thermischer Energie im Boden keine relevante Rolle. Deshalb werden im Folgenden die beiden Ersten beschrieben.

Die *Konduktion* wird auch als Wärmeleitung bezeichnet und über das Fouriersche Gesetz beschrieben. Sie stellt den innerstofflichen Wärmetransport über Moleküle von Orten mit energetisch höherem Potenzial zu Orten mit energetisch niedrigerem Potenzial dar. Das energetische Potenzial ist im Wesentlichen durch die Temperatur gekennzeichnet. Als Proportionalitätsfaktor für die Berechnung des Wärmestromdichte \dot{q} aus dem Temperaturgradienten $\operatorname{grad}(T)$ nach Gleichung (2.10) wurde die Wärmeleitfähigkeit λ als temperaturabhängige Materialkonstante eingeführt.

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \operatorname{grad}(T) \quad (2.10)$$

Konvektion ist der Energietransport über die Bewegung von Stoffen und deren Energieaufnahme an Orten mit energetisch höherem Potenzial und Abgabe an Orten mit energetisch niedrigerem Potential. Der transportierte Energieinhalt wird über die Wärmekapazität des bewegten Stoffes c_V und seine Temperatur festgelegt. Die Dichte des Wärmestromes kann nach Gleichung (2.11) mit dessen Relativgeschwindigkeit v errechnet werden.

$$\dot{q} = c_V \cdot v \cdot T \quad (2.11)$$

Latentwärmestransport ist der Transport von Energie über Wasserdampf und dessen Phasenumwandlung. Die Berechnung der Wärmestromdichte erfolgt nach Gleichung (2.12). Dabei sind H die spezifische Verdampfungswärme des Wassers ($2,5 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$), ρ die Dichte des Wasserdampfes und v die Relativgeschwindigkeit des Wasserdampfes.

$$\dot{q} = H \cdot \rho \cdot v \quad (2.12)$$

Die temperaturabhängigen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität sind über die Temperaturleitfähigkeit κ nach der Gleichung (2.13) verknüpft

$$\kappa = \frac{\lambda}{c_V} \quad (2.13)$$

Die volumetrische Wärmekapazität kann nach Gleichung (2.14) aus der spezifischen Wärmekapazität über die Dichte ρ berechnet werden.

$$c_V = \rho \cdot c \quad (2.14)$$

2.4.2 Linienquellentheorie

Die mathematische Basis für die Berechnung der Veränderung der Untergrundtemperatur T aufgrund von linienförmigen thermischen Energiequellen im Abstand r zum Zeitpunkt t wird durch die Kelvin'sche Linienquellentheorie gebildet. Die Linienquellentheorie wird auch zur Auswertung von Messungen der Wärmeleitfähigkeit mittels Nadelsonden nach Abschnitt 3.2 angewendet. Beschreibungen zur Anwendung der Linienquellentheorie finden sich bei zahlreichen Autoren (de Vries, 1952; Blackwell, 1954 und Carslaw & Jäeger, 1959). Die Linienquellen- sowie die hierauf aufbauende Zylinderquellentheorie findet Anwendung in der Auswertung von Geothermal Response Rests zur Bestimmung der thermischen Bodenkennwerte um Erdwärmesonden (Sass et al., 2015a; Huber, 2013; Sass & Lehr, 2011). Die Voraussetzung für die Anwendung der Linienquellentheorie nach Gleichung (2.15) ist die Annahme der Linienquelle als

- idealer thermischer Leiter mit
- unendlicher Länge,
- vernachlässigbarem Radius und
- vernachlässigbarer Wärmekapazität

in einer unendlich ausgedehnten Umgebung. Die Leistung P stellt hierbei einen konstanten Wärmestrom dar und l die Länge, über die der Wärmestrom eingebracht wird.

$$T(r, t) = \frac{P}{l \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda} \text{Ei} \left(\frac{r^2}{4 \cdot \kappa \cdot t} \right) \quad (2.15)$$

Die Exponential-Integral-Funktion kann nach Gleichung (2.16) approximiert werden.

$$\text{Ei}\left(\frac{r^2}{4 \cdot \kappa \cdot t}\right) = \ln\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot t}{r^2}\right) - \gamma \quad (2.16)$$

Unter Verwendung der Euler-Mascheroni-Konstante $\gamma = 0,57722\dots$ ergibt sich für die Untergrundtemperatur Gleichung (2.17).

$$T(r, t) = \frac{P}{l \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[\ln\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot t}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (2.17)$$

Die absolute Leitertemperatur T wird auf Basis der ungestörten Boden- bzw. Leitertemperatur T_0 berechnet. In der Realität tritt ein thermischer Widerstand zwischen Kabel und Boden auf. Dieser wird mathematisch durch den Übergangswiderstand R_B ausgedrückt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} wird als Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit und die effektive Diffusivität κ_{eff} als Mittelwert der Diffusivität der Kabelumgebung eingeführt. Daraus ergibt sich Gleichung (2.18).

$$T(t) = T_0 + \frac{P}{l \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{eff}}} \cdot \left[\ln\left(\frac{4 \cdot \kappa_{\text{eff}} \cdot t}{r^2}\right) - \gamma \right] + \frac{P}{l} \cdot R_B \quad (2.18)$$

Unter Annahme einer konstanten Ausgangstemperatur T_0 kann Gleichung (2.41) unter Zusammenfassung aller Konstanten zu Gleichung (2.19) vereinfacht werden.

$$T(t) = \frac{P}{l \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{eff}}} \cdot \ln(t) + \text{Konst.} \quad (2.19)$$

Die Änderung der Leitertemperatur über die Zeit ist nach Gleichung (2.19) im stationären Zustand proportional zu $\ln(t)$ und umgekehrt proportional zu λ_{eff} . Aufgelöst nach der effektiven Wärmeleitfähigkeit ergibt sich Gleichung (2.20).

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{P}{l \cdot 4 \cdot \pi} \cdot \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{T(t_2) - T(t_1)} \quad (2.20)$$

Nach Eklöf & Gehlin (1996) ist eine annähernd konstante Steigung der Temperatur für die Berechnung von λ_{eff} notwendig. Diese ist nach einer Mindestzeit nach Eskilson (1987) entsprechend Gleichung (2.21) erreicht. Deswegen wird diese Mindestversuchsdauer für Geothermal Response Tests zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Böden in Sanner (1999) empfohlen.

$$t_{\min} > \frac{5r^2}{\kappa} \quad (2.21)$$

Sollen bei der Auswertung von Geothermal Response Tests zusätzlich radiale und axiale Wärmeströme berücksichtigt und die Wärmekapazität des Bodens bestimmt werden, ist eine Auswertung nach der Zylinderquellentheorie (Sass & Lehr, 2011) notwendig.

2.5 Kennwerte von Lockergesteinen

Feuchtes Lockergestein ist ein Dreiphasensystem aus Feststoff, Luft und Wasser (Abbildung 2.4). Die Hohlräume (Poren) zwischen den Bodenteilchen können anteilig mit Luft und Wasser gefüllt sein. Die Begrifflichkeiten zur Beschreibung des Dreiphasensystems Boden sind in der DIN 18125 Teil 1 und DIN 18124 festgelegt (Sass, 2007).

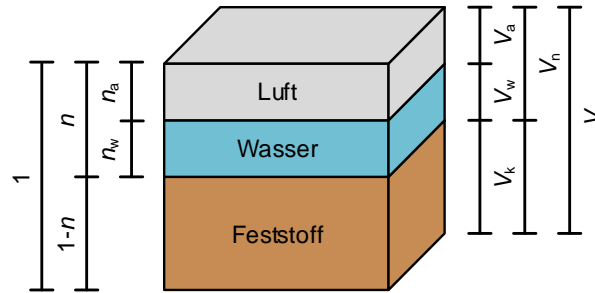


Abbildung 2.4: Dreiphasensystem Boden (die relative Luftfeuchte in der Bodenluft beträgt in der Regel mehr als 95 %)

Der Porenanteil n nach Gleichung (2.22) entspricht dem Hohlraumvolumen V_n bezogen auf das Gesamtvolumen V des Lockergesteins. Das Hohlraumvolumen wiederum setzt sich zusammen aus dem Luftvolumen V_a , dem Wasservolumen V_w und dem Kornvolumen V_s .

$$n = \frac{V_n}{V} = \frac{V - V_s}{V} \quad (2.22)$$

Die Dichte ρ nach Gleichung (2.23) ist der Quotient aus Masse m und Volumen V eines Bodenkörpers.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.23)$$

Für die Beschreibung des Bodens und seiner Bestandteile werden fünf Dichtebegriffe eingeführt. Die Korndichte ρ_s nach Gleichung (2.24) ist die Rohdichte der festen Einzelbestandteile.

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_s} \quad (2.24)$$

Die Trockendichte ρ_d nach Gleichung (2.25) ist die Trockenmasse m_d des Bodens, bezogen auf das Volumen des Bodens.

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} = (1 - n) \cdot \rho_s \quad (2.25)$$

Die Feuchtdichte ρ nach Gleichung (2.26) ist die Masse m des feuchten Bodens, bezogen auf das Volumen des Bodens.

$$\rho = \frac{m}{V} = (1 - n) \cdot \rho_s(1 + w) \quad (2.26)$$

Die Feuchtdichte ist eine Funktion des Wassergehaltes w eines Bodens. Der Wassergehalt stellt nach Gleichung (2.27) das Verhältnis der Masse des im Boden vorhandenen Wassers m_w , das bei einer Temperatur von 105° C verdampft, zur Masse m_d der trockenen Probe dar.

$$w = \frac{m - m_d}{m_d} = \frac{m_w}{m_d} \quad (2.27)$$

Die Sättigungsdichte ρ_r nach Gleichung (2.28) ergibt sich, wenn die Poren nur Wasser enthalten unter Berücksichtigung der Wasserdichte ρ_w .

$$\rho_r = (1 - n) \cdot \rho_s + n \cdot \rho_w \quad (2.28)$$

Aus der Trockenrohdichte und Korndichte kann der Porenanteil n nach Gleichung (2.29) berechnet werden.

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (2.29)$$

Als Luftporenanteil n_a nach Gleichung (2.30) wird der Teil der Poren bezeichnet, der mit Luft gefüllt ist.

$$n_a = 1 - \rho_d \cdot \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} \right) \quad (2.30)$$

Die Sättigungszahl S_r nach Gleichung (2.31) kennzeichnet das Verhältnis des wassergefüllten Porenanteils zum gesamten Porenanteil.

$$S_r = \frac{n_w}{n} \quad (2.31)$$

2.6 Wasserverteilung und Potenzialkonzept

Böden bilden im Bereich der Grundwassersättigung bis zur scheinbar geschlossenen Grundwasseroberfläche ein Zwei-Phasen-System aus Bodenkörnern und -wasser. Im darüber liegenden Bereich befindet sich die wasserungesättigte Zone (Abbildung 2.5), die zeitlich und räumlich variabel, wie beispielsweise nach Regenereignissen, auch lokale Sättigungszonen aufweisen kann (Hölting & Coldewey, 2013). In der Gesamtbetrachtung ist die wasserungesättigte Zone ein Drei-Phasen-System aus Bodenkörnern, -wasser und -luft. Erdkabel sind in Verlegetiefen von 0,6 m bis 1,2 m zumeist in der wasserungesättigten Zone verlegt.

Nach Zunker (1930) erfolgt die Einteilung von Wasser im Untergrund in fünf Typen:

- *Grundwasser*, das die Hohlräume des Bodens zusammenhängend ausfüllt;
- *Kapillarwasser*, das durch Oberflächenspannung über den Grundwasserspiegel zur Geländeoberfläche hin angehoben wird. Die kapillare Steighöhe liegt in Grobsand bei etwa 0,3 bis 1 m, in Grobschluff etwa zwischen 1 und 3 m und in Feinschluff ungefähr zwischen 3 und 10 m;
- *Adsorbiertes Wasser* an der Oberfläche einzelner Mineralkörner (auch hygroskopisches Wasser genannt);
- *Haftwasser*, das infolge von Oberflächenspannungen z. B. in den Winkeln zwischen einzelnen Körnern haftet (Porenwinkelwasser);
- *Sickerwasser*, welches von der Geländeoberfläche her in den Boden eindringt.

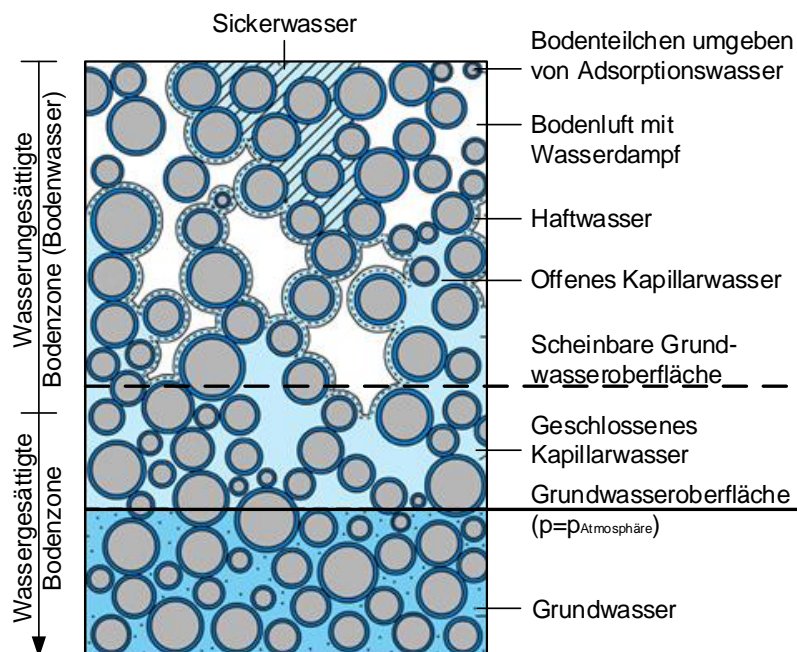


Abbildung 2.5: Erscheinungsformen und Bezeichnungen von Wasser im Untergrund (verändert nach Zunker, 1930 und Hölting & Coldewey, 2013)

2.6.1 Teilpotenziale

Das Potenzialkonzept zur Beschreibung der antreibenden Kräfte für Wasserbewegungen im Boden wurde maßgeblich von Buckingham (1904) entwickelt. Das Gesamtpotenzial Ψ setzt sich aus der Summe aller Teilpotenziale zusammen und wird nach Gleichung (2.32) meist in der Einheit eines Druckes angegeben. Als Bezugspunkt dient der freie Wasserspiegel. Im Boden ist dies die Grundwasseroberfläche nach Abbildung 2.5, da hier kein hydrostatischer Druck vorhanden ist und Atmosphärendruck herrscht. Im Folgenden sind

die einzelnen Potenzialbestandteile (Hartge & Horn, 1999; Blume et al., 2010; Becher, 2014) dargestellt.

$$\Psi = \Psi_z + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_\Omega + \Psi_p \quad (2.32)$$

Das *Gravitationspotenzial* Ψ_z wird auch als geodätisches Potenzial bezeichnet. Das Bezugsniveau ist die Grundwasseroberfläche. Die Höhe über der Grundwasseroberfläche wird mit positivem, die Höhe unterhalb der Grundwasseroberfläche mit negativem Vorzeichen ausgedrückt, so dass es beim Hinabfließen Arbeit verrichten kann. Wird als Bezugsgröße des Potenzials das Gewicht verwendet, kann das Potenzial als Ortshöhe über dem Grundwasser angegeben werden.

Das *Matrixpotenzial* Ψ_m entspricht dem Betrag der Arbeit, die verrichtet werden muss, um dem Boden eine bestimmte Mengeneinheit Bodenwasser in einer bestimmten Bodenhöhe zu entziehen. Es ist die Folge der Adhäsion der Wassermoleküle an den Mineraloberflächen und der Kohäsion der Wassermoleküle untereinander. Das Matrixpotenzial kann mit Tensiometern gemessen werden, die mit dem Wasser im Boden in Verbindung gebracht werden. Wenn das Gravitationspotenzial positiv angesetzt wird, erhält das Matrixpotenzial ein negatives Vorzeichen.

Das *osmotische Potenzial* Ψ_o wird durch die Hydratation von Ionen in der Lösung des Bodenwassers verursacht. Dieses Potenzial entspricht der Arbeit, die verrichtet werden muss, um dem Boden dieses Wasser ohne gelöste Stoffe über eine semipermeable Membran zu entziehen. Das osmotische Potenzial wird bei Tensiometermessungen nicht miterfasst.

Ein *Auflastpotenzial* Ψ_Ω entsteht, wenn Bodenteilchen durch eine räumlich begrenzte äußere Last, wie z. B. neuerrichtete Bauwerke, zusammengedrückt werden und das Wasser nicht sofort entweichen kann (Terzaghi & Peck, 1963). Als Folge daraus wird ein Teil der Last durch das Wasser getragen. Dieses Potenzial tritt im Boden solange auf, bis sich die Wasserteilchen umgelagert haben, und kann mit Tensiometern gemessen werden.

Das *Druckpotenzial* Ψ_p kommt durch die Auflast eines zusätzlichen Gas- oder Wasserdruckes zustande. Während das Auflastpotenzial durch Druck auf die festen Bestandteile des Bodenkörpers entsteht, die dann wiederum auf die flüssige Phase drücken, kommt das Druckpotenzial durch direkten Druck auf die flüssige Phase zustande. Das Druckpotenzial kann mit Piezometern oder Manometern gemessen werden.

Der kapillare Aufstieg und die Versickerung bzw. Dränung des Wassers werden durch Potenzialunterschiede angetrieben und erfolgen solange, bis das Gesamtpotenzial an allen Stellen ausgeglichen ist. Bei der Messung von Potenzialen werden durch die gleichen

Messverfahren unterschiedliche Potenziale miterfasst. Deswegen erfolgte eine Gruppierung. Eine häufig verwendete Kombination ist die Zusammenfassung des Matrixpotenzials mit dem Druckpotenzial und dem Auflastpotenzial. Die Summe dieser Potenziale wird zusammen mit dem Gravitationspotenzial als hydraulisches Potenzial bezeichnet. Das *hydraulische Potenzial* Ψ_h nach Gleichung (2.33) wird als Annäherung an das Gesamtpotenzial verwendet. Dabei kann nach Hartge & Horn (1999) das osmotische Potenzial vernachlässigt werden, weil die Betrachtung auf die Bodenlösung gerichtet ist und Unterschiede im Salzgehalt bei Betrachtung des Wasserkörpers alleine keine Rolle spielen.

$$\Psi_h = \Psi_z + \Psi_m + \Psi_\Omega + \Psi_p \quad (2.33)$$

Im Gleichgewichtszustand gilt $\Psi_h = 0$. In Abbildung 2.6 ist der Zusammenhang der Teilpotenziale dargestellt. Die gestrichelten Linien stellen Ungleichgewichtszustände dar, wie sie beispielsweise während der Versickerung von Wasser auftreten.

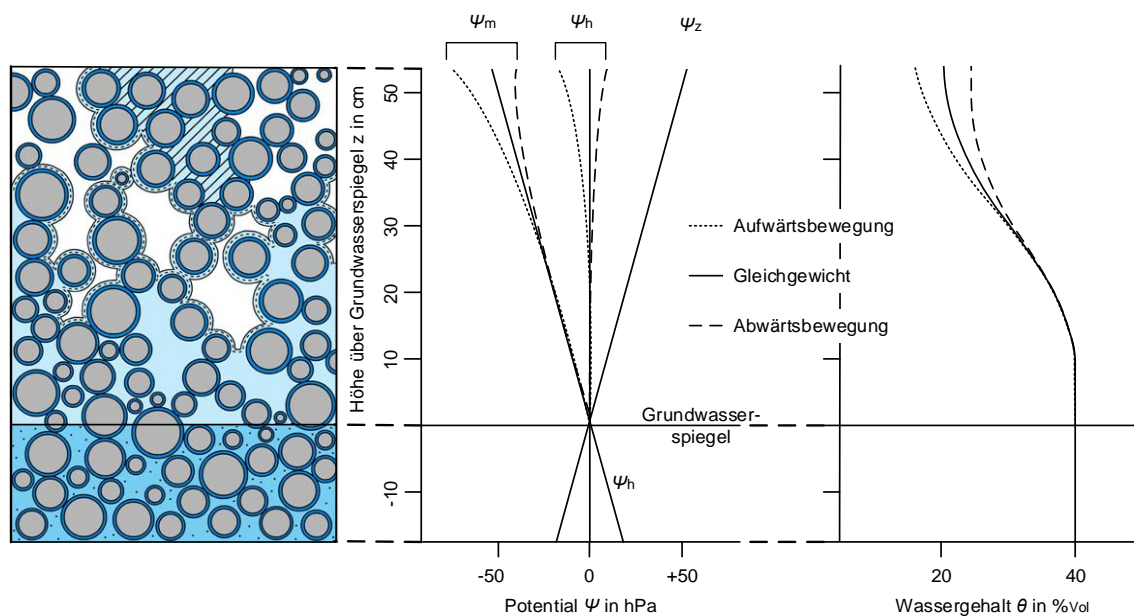


Abbildung 2.6: Zusammenhang der Teilpotenziale (verändert nach Hölting & Coldewey, 2013 und Blume et al., 2010)

2.6.2 Wasserspannungskurve

Die Wasserspannungskurve wird auch als Kapillardruck-/Sättigungsbeziehung, Saugspannungs-/Sättigungskurve, Matrixpotenzial-/Sättigungsbeziehung oder pF-Kurve bezeichnet, wobei der pF-Wert dem logarithmierten Wert der Wasserspannung entspricht. Sie ist vom Porenvolumen und der Verteilung der Porengröße abhängig. Typische Kurven für verschiedene Bodenarten nach Blume et al. (2010) sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Darin stellt

der permanente Welkepunkt die Grenze der maximalen Saugspannung und Entwässerung durch Pflanzenwurzeln dar.

Unmittelbar an der Oberfläche der Bodenpartikel sind die Wassermoleküle in einer monomolekularen Wasserschicht gebunden. Die Bindungsenergie liegt bei 1000 MPa, was dazu führt, dass die Wassermoleküle entsprechend ihrem Dipolcharakter exakt ausgerichtet werden. Die nächste Molekülschicht ist mit ca. 200 MPa gebunden, was mit ersten Lockerungen immer noch zu einer Ausrichtung der Wassermoleküle führt. Mit jeder weiteren Schicht nimmt der Abstand zum festen Partikel zu und die Bindungsenergie und auch der Ausrichtungsgrad der Wassermoleküle ab. Die Bindungsenergie des Bodenwassers steigt deswegen bei gleichem Wassergehalt mit zunehmendem Feinkornanteil, was auf einer Zunahme der adsorbierenden Oberfläche und einer Abnahme des Porendurchmessers beruht (Becher, 2014).

Da sich die Poren oder Hohlräume im Boden über mehrere Größenordnungen erstrecken und ein Kontinuum mit einer meist bizarren Form bilden, wird ihnen zur Beschreibung eine Kreiskapillare mit einem Äquivalenzdurchmesser zugeordnet. Das Bodenwasser in den Grobporen mit einem Äquivalenzdurchmesser größer 60 µm ist frei beweglich, während in den Mittel- (10 bis 0,2 µm) und Feinporen (kleiner 0,2 µm) Bindungskräfte zwischen Wassermolekülen und Bodenmatrix (Adhäsion) und zwischen den Wassermolekülen selbst (Kohäsion) dafür sorgen, dass das Wasser nicht mehr am Transportgeschehen teilnehmen kann (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

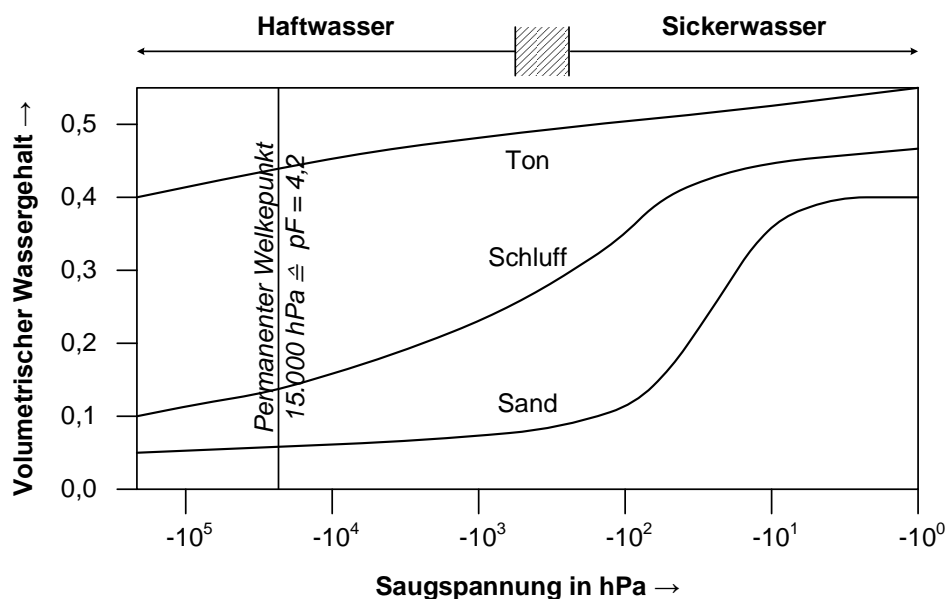


Abbildung 2.7: Wasserspannungskurven typischer Böden in Abhängigkeit der Bodenart (verändert nach Blume et al., 2010)

2.6.2.1 Hysterese der Wasserspannungskurve

Die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt ist eine hysteretische und durch die Be- bzw. Entwässerungsgeschichte beeinflusste Funktion (Childs, 1969). Ursachen für die Hysterese sind die unregelmäßige Porengeometrie und Tortuosität, der Einschluss der nichtbenetzenden Phase in der benetzenden Phase und die dynamischen Kontaktwinkel. In der Bodenkunde werden die ersten beiden als Hauptursachen gesehen (Busch et al., 1993; Montenegro, 1994), weil die Veränderungen im Wassergehalt in Abhängigkeit der Wasserspannung aufgrund der langen Be- und Entwässerungsvorgeschichte im Bereich zwischen der Hauptdränage- und der Hauptbefeuchungskurve nach Abbildung 2.8 liegen und zum Betrachtungszeitpunkt statische Verhältnisse vorliegen (Vogler, 1999).

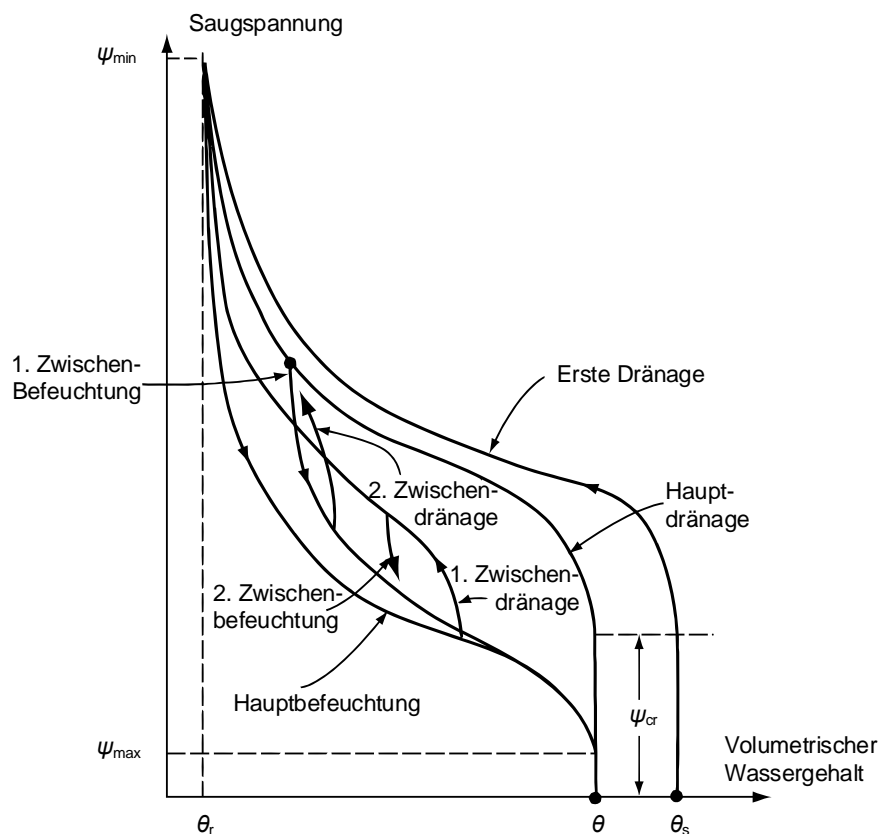


Abbildung 2.8: Prinzipielle Darstellung der Wasserspannungskurve (nach Fairbridge & Finkl, 1979)

Die unregelmäßige Porengeometrie führt zum sogenannten Ink-bottle-effect (Miller & Miller, 1956). Dabei bleiben bei der Entwässerung von großen Poren die Menisken an engeren Querschnitten zu anderen Poren hängen, wobei ein Entleeren der Poren verhindert wird. Bei der Bewässerung wiederum wird das Ansteigen des Wasserspiegels von größerer

ren Poren verhindert (Abbildung 2.9), Dabei sind R_t der maximale und r_t der minimale Radius der Pore. Der Radius der ausgebildeten Menisken ist bei gleicher Wasserspannung in beiden Fällen gleich, während sich unterschiedliche Wassergehalte in der Pore ausbilden. Das Verhältnis zwischen aktiver und passiver Steighöhe des Wassers wird somit von den Verhältnissen der Porendurchmesser zu den Durchmessern der Engstellen bestimmt.

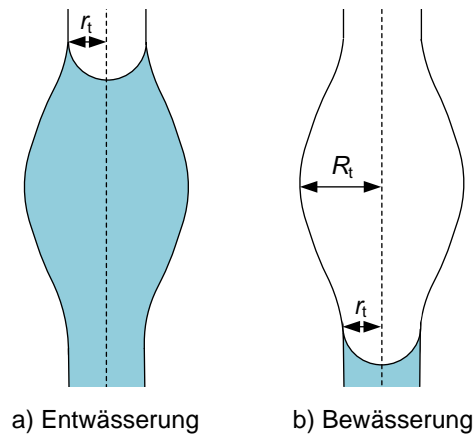


Abbildung 2.9: Hysterese des Wassergehaltes in einer Pore bei gleichen Saugspannungen aufgrund des Ink-bottle-effect (nach Marshall & Holmes, 1988)

Die Vorgänge beim Einschluss der nichtbenetzenden Phase in der benetzenden Phase können nach dem Doppelkapillaren-Modell nach Moore & Slobod (1956) beschrieben werden. Aufgrund der Vernetzung der Poren wird Luft durch aufsteigendes Wasser in Poren mit kleineren Querschnitten, die sich in Poren mit größeren Querschnitten befindet, eingeschlossen Abbildung 2.10. In der Doppelkapillare A ist eine vollständige Füllung mit der benetzenden Phase gegeben. B zeigt den in Abhängigkeit der Oberflächenspannung der benetzenden Phase entstehenden gekrümmten Meniskus nach dem Abfallen des Wasserspiegels. In C ist die Doppelkapillare wieder mit Wasser gefüllt und die Luft ist in Bezug auf die herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen irreversibel in der Kapillare eingeschlossen.

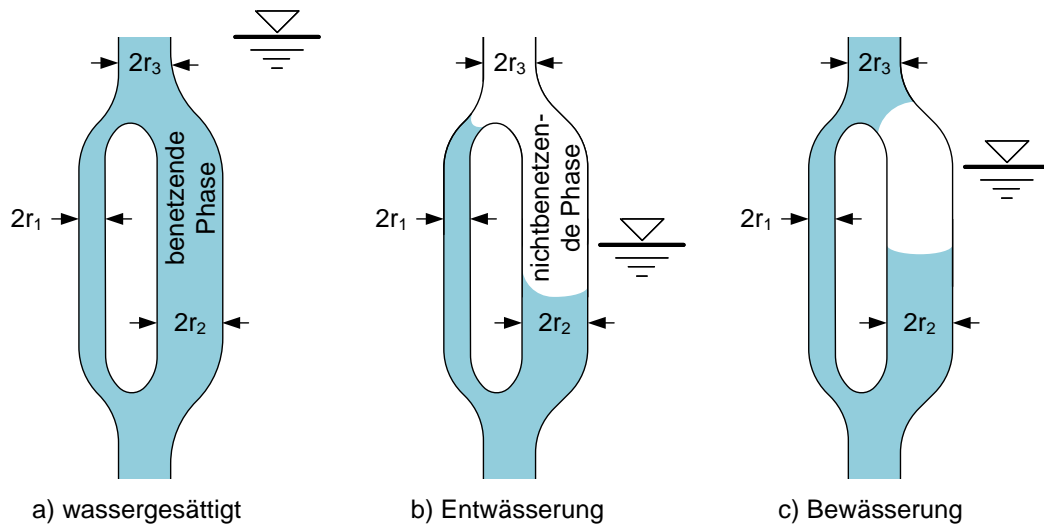


Abbildung 2.10: Ent- und Bewässerung einer Doppelkapillare mit $r_1 < r_3 < r_2$ (Vogler, 1999)

Abhängig von der Stärke der vorhergehenden Be- oder Entwässerung können in der Natur beliebig viele Schleifen zwischen den maximalen Be- und Entwässerungskurven auftreten. Zudem beeinflussen die Veränderung der Benetzbarkeit der Körner sowie die nur teilweise reversiblen Gefügeänderungen des Bodens das Wasserbindeverhalten (Blume et al., 2010; Hartge & Horn, 1999). Zumeist treten bei bodenkundlichen Fragestellungen nicht die Hauptbefeuchungskurve und die Hauptdrainagekurve, sondern dazwischenliegende Kurven auf (Durner, 1991).

2.6.2.2 Definition der Wasserspannungskurve

Die experimentell gewonnenen Daten liegen zumeist als einzelne Messpunkte der Wasserspannung und der zugehörigen Wassergehalte vor. Zur Überführung dieser Punkte in eine stetige Funktion stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. In der Praxis wird oft die Näherung nach van Genuchten (1980) entsprechend Gleichung (2.34) eingesetzt. Diese Funktion zeigt für sigmoidale Verläufe der Messwerte bzw. der zugehörigen stetigen Funktion gute Anpassungseigenschaften. Für intermittierend gestufte Kurvenverläufe wird die Funktion nach Durner (1994), die die Überlagerung zweier van Genuchten-Modelle darstellt, eingesetzt. Die van Genuchten Funktion enthält fünf Parameter. Den Restwassergehalt nach der Entwässerung θ_r , den Sättigungswassergehalt θ_s , den Maßstabsfaktor α zur Definition des Porengrößenmaximums und die Parameter n und m zur Beschreibung der Porengrößenverteilung. Die Ad-hoc-AG Boden (1999) stellt Formeln zur Berechnung von Näherungswerten für die genannten Parameter auf Basis der Kornsummenlinie und der Trockenrohdichte von Böden zur Verfügung.

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\Psi|)^n]^m} \quad (2.34)$$

Die effektive Sättigung S_e kann nach Gleichung (2.35) berechnet werden (Vogler, 1999).

$$S_e = \frac{\theta(\Psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.35)$$

In Tab. 2.2 ist eine Auflistung der von verschiedenen Autoren entwickelten Funktionen für die Beschreibung der Wasserspannungskurve gegeben. In der mathematischen Beschreibung sind die Wassergehaltsparemeter durch die effektive Sättigung substituiert. Wesentliche Unterschiede weisen die Funktionen am Lufteintrittspunkt auf, wo die Funktionen von Brooks & Corey (1964), Farrel & Larson (1972) und Rogowski (1971) eine unstete Ableitung und damit einen Knick aufweisen, wie er in künstlich gepackten Bodensäulen auftritt. Natürliche Böden zeigen keinen scharfen Knick am Lufteintrittspunkt (Vogler, 1999).

Tabelle 2.2: Mathematische Beschreibung der Wasserspannungskurve (erweitert nach Vogler, 1999)

Autor	Funktion	Parameter
Brooks & Corey (1964), Campbell (1974)	$S_e = \left(\frac{h_d}{h}\right)^{-\lambda}$ für $h > 0$ $S_e = 1$ für $h \leq 0$	H_d, λ
King (1965)	$S_e = \frac{\cosh\left[\left(\frac{h}{h_0}\right)^b + \epsilon\right] - \gamma}{\cosh\left[\left(\frac{h}{h_0}\right)^b + \epsilon\right] + \gamma}$	h_0, b, ϵ, γ
Brutsaert (1967), Taylor & Luthin (1969), Ahuja & Schwarzendruber (1972)	$S_e = [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-1}$ für $h > 0$	α, n
Laliberte (1969)	$S_e = 0,5 \cdot \operatorname{erfc}\left(a - \frac{b}{c + \frac{h}{h_a}}\right)$	a, b, c, h_a
Rogowski (1971), Farrel & Larson (1972)	$S_e = 1 + \ln[(\alpha \cdot h)^{-n}]$ für $h > 0$ $S_e = 1$ für $h \leq 0$	α, n
Rogowski (1971)	$S_e = 1 + \ln\left[\left(h - \frac{1}{\alpha} + 1\right)^{-n}\right]$ für $h > 0$ $S_e = 1$ für $h \leq 0$	α, n
Simmons et al. (1979)	$S_e = \frac{1}{1 + \ln\left(\frac{1}{1 + (\alpha \cdot h)^n}\right)}$	α, n
D' Hollander (1979)	$S_e = 0,5 \cdot \operatorname{erfc}(\ln((\alpha \cdot h)^n))$	α, n
van Genuchten (1980)	$S_e = [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m}$	α, n, m
Durner (1992)	$S_e = \sum_{j=1}^2 w_j (1 + (\alpha_j h)^{n_j})^{\left(\frac{1}{n_j} - 1\right)}$	w, α, n, m

2.6.3 Permeabilität und hydraulische Leitfähigkeit

Die gesättigte Permeabilität K eines Bodens errechnet sich nach Gleichung (2.36) aus der Fließrate Q , der dynamischen Viskosität des Fluids η , der durchströmten Länge l des Bodenkörpers, der durchströmten Querschnittsfläche A und der sich einstellenden Druckdifferenz Δp . Sie stellt eine Materialkonstante des Bodens dar.

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot l}{A \cdot \Delta p} \quad (2.36)$$

Die hydraulische Leitfähigkeit k_f wird nach Gleichung (2.36) aus der Permeabilität K , der Dichte des Wassers ρ , der Erdbeschleunigung g und der dynamischen Viskosität von Wasser bei 20 °C bestimmt.

$$k_f = \frac{K \cdot \rho \cdot g}{\eta} \quad (2.37)$$

Im Gegensatz zur gesättigten Permeabilität, die eine Materialkonstante darstellt, ist die teilgesättigte Permeabilität nur für den jeweiligen Sättigungsgrad konstant.

Da die Sättigung wiederum mit der Saugspannung verknüpft ist, kann die Permeabilität in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der Saugspannung beschrieben werden. Zahlreiche Autoren haben Funktionen hierfür entwickelt (Wind, 1955; Brooks & Corey, 1964; Mualem, 1976; Jaynes & Tyler, 1984; Parker, 1989). Die zugehörigen Modelle gehen davon aus, dass mit steigender Wasserspannung die wassergefüllten Poren absteigend nach ihren Porendurchmessern entleert werden und damit ein zunehmend geringerer wasserleitender Querschnitt im Bodenkörper zur Verfügung steht. Damit nimmt die teilgesättigte Permeabilität ab.

In der Bodenphysik wurde deswegen als Quotient aus teil- und vollgesättigter Permeabilität die relative Permeabilität K_r eingeführt. Für die Berechnung der relativen Permeabilität für die benetzende Phase $K_{r,b}$ wird häufig Gleichung (2.38) nach Mualem (1976) verwendet. Dabei stellt S_b die Sättigung der benetzenden Phase und m eine bodenartabhängige Konstante dar.

$$K_{r,b} = S_b^{3-2m} \quad (2.38)$$

Von Parker (1989) wurden darauf aufbauend die Gleichungen (2.39) und (2.40) zur Berechnung der relativen Permeabilität für eine benetzende Phase und einer nicht benetzenden Phase $K_{r,nb}$, die in der Regel Bodenluft darstellt, entwickelt.

$$K_{r,nb} = S_{nb}^{\frac{1}{2}} \left[1 - (1 - S_{nb})^{\frac{1}{m}} \right]^{2m} \quad (2.39)$$

$$K_{r,b} = S_b^{\frac{1}{2}} \left[1 - (1 - S_b^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (2.40)$$

Verläufe dieser Funktionen sind für typische Bodenarten und Porenfüllungen aus Bodenwasser und -luft in Abbildung 2.11 dargestellt. Bei feinkörnigen Böden sind höhere Wassergehalte zur Erreichung hoher relativer Wasserpermeabilitäten notwendig, als bei grobkörnigen Böden. Die Funktionen der relativen Bodenluftpermeabilität und der Wassersättigung zeigen weniger starke Krümmungen. Dies hat zur Folge, dass ein Dampftransport über die wassergesättigte Bodenluft aufgrund von Dampfdruckgradienten auch bei geringen Wassersättigungen in allen Böden möglich ist. Der Rückfluss des kondensierten Wassers aufgrund Gradienten in der Kapillarspannung läuft in feinkörnigen Böden mit niedriger Sättigung aber langsamer als in grobkörnigen Böden ab, was ein Austrocknen dieser Böden um Wärmequellen begünstigt (Campbell et al., 1994).

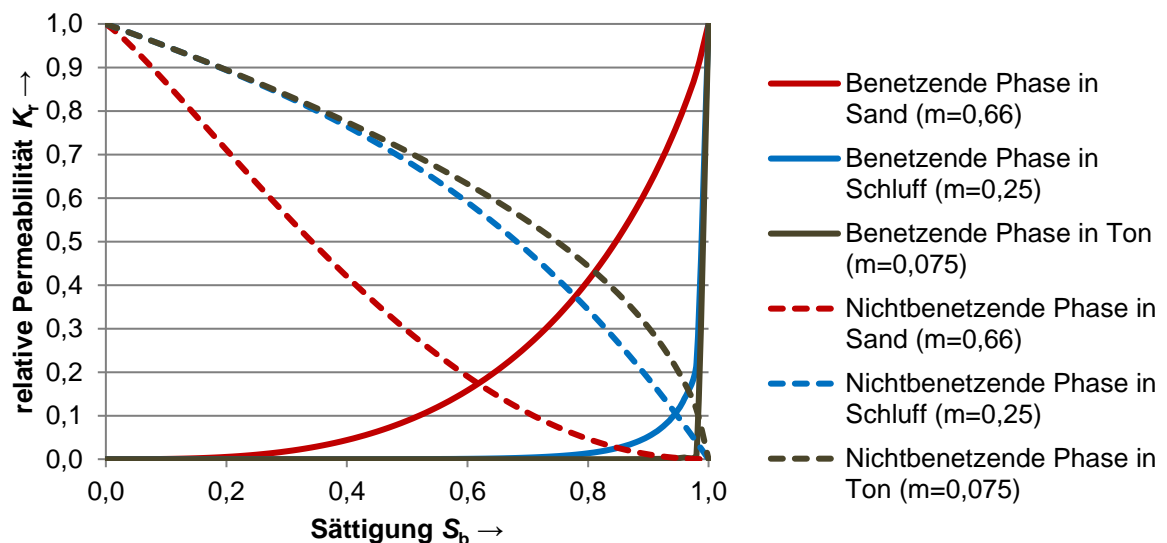


Abbildung 2.11: Relative Permeabilitäten des Porenraumes typischer Bodenarten in Abhängigkeit der Sättigung

2.7 Natürliche Einflüsse auf die Bodentemperatur

Der Wärmehaushalt des Bodens wird maßgeblich von der Energiezufuhr über die Oberfläche und die Wärmespeicher und -leitungseigenschaften des Bodens beeinflusst. Dabei gilt nach Jury & Horton (2004) die breitengradabhängige kurzwellige Sonneneinstrahlung als bedeutsamste Energiequelle für den Boden. Die Energie, die als Globalstrahlung auf die Erdoberfläche auftrifft, ist wetter- und klimaabhängig und in der Jahres- und Tageszeit variabel. Sie stellt den nicht von der Atmosphäre und der Hydrosphäre absorbierten oder reflektierten bzw. rückgestreuten Anteil der extraterrestrischen Strahlung dar. Abbildung 2.12 zeigt eine mögliche Strahlungsbilanz an einem Sommertag bei mittlerer Bewölkung. Die Energieaufnahme und -weiterleitung des Bodens, sowie die Reflexionen, Ausstrahlungen und Energieverluste über Evapotranspiration sind von der stofflichen Zusammensetzung des Bodengefüges, dem Bodenwasser und der Bodenluft abhängig.

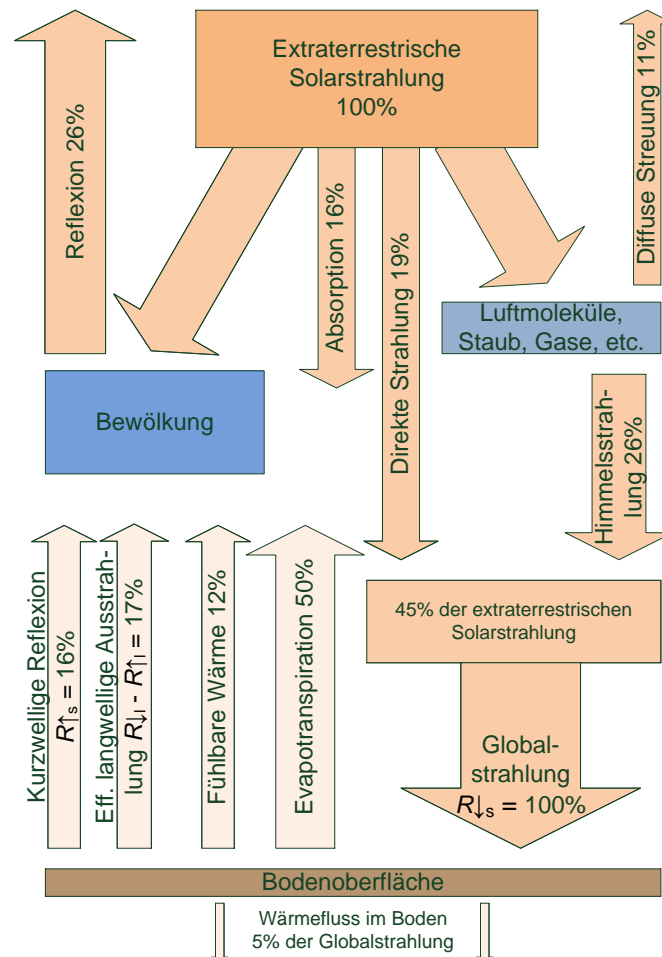


Abbildung 2.12: Mögliche Verteilung der Strahlungskomponenten und Energiebilanz an der Bodenoberfläche (Daten aus Jury & Horton, 2004)

Als Globalstrahlung wird die gesamte auf die Erdoberfläche einfallende kurzwellige Sonneneinstrahlung $R \downarrow_s$ bezeichnet. Dies ist eine Energiemenge von 342 Wm^{-2} im globalen jährlichen Durchschnitt. Davon wird ein Teil wieder zur Atmosphäre hin reflektiert und ein Teil durch die Atmosphäre absorbiert. Ein geringer Anteil der Globalstrahlung geht als Wärmefluss in den Boden. Ein größerer Teil wird an der Erdoberfläche durch die Reflexion kurzwelliger Strahlung $R \uparrow_s$ und durch die ständige langwellige Wärmestrahlung des Bodens $R \uparrow_l$ wieder ausgestrahlt und anteilig von Wolken als langwellige atmosphärische Gegenstrahlung $R \downarrow_l$ reflektiert. Die Nettostrahlungsbilanz an der Erdoberfläche $R \downarrow_n$ ergibt sich demnach aus vier Hauptkomponenten nach Gleichung (2.41).

$$R \downarrow_n = R \downarrow_s - R \uparrow_s + R \downarrow_l - R \uparrow_l \quad (2.41)$$

Ist die Nettostrahlungsbilanz an der Erdoberfläche $R \downarrow_n$ positiv, wird dem Boden Energie in Form von Wärme zugeführt. Diese wird als fühlbare Wärme wahrgenommen und treibt die Evapotranspiration an, oder sie fließt als Wärme in den Boden, wo sie z. B. um Erdkabel für eine Erwärmung der Umgebung sorgt. Ist die Strahlungsbilanz negativ, erfolgt ein Abtrag von Energie. Der Wärmetransport in den Boden wird mit zunehmender Tiefe gedämpft und in der Phase gegenüber der Oberflächentemperatur verschoben. Die Amplituden der Bodentemperatur gleichen sich in einer Tiefe von 15 bis 30 m an die Jahresmitteltemperatur des Standortes an. Diese liegt in Deutschland bei ca. 10°C . Ab dieser neutralen Zone erfolgt mit zunehmender Tiefe im Mittel eine lineare Erhöhung der Temperatur mit dem geothermischen Gradienten von 30 Kkm^{-1} (Sass et al., 2015a). Analog zum Jahrestemperaturverlauf schwanken die Bodentemperaturen innerhalb eines Tages im obersten Bereich. Die Eindringtiefe der täglichen Temperaturänderungen bleibt in Böden auf maximal ca. 50 cm beschränkt (Bachmann, 1997).

3 STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK

3.1 Berechnung der Kabelbelastbarkeit von Energiekabeln

Es ist in der Energiewirtschaft bekannt, dass die Boden- und Standortbedingungen einen Einfluss auf die Erwärmung und damit die Belastbarkeit von Erdkabeln haben. Die Bodenwärmewiderstände und die Umgebungstemperatur werden deswegen bei normierten Berechnungsverfahren der Belastbarkeit berücksichtigt (IEC60287-2; DIN VDE 0276).

Die Bodenwärmeleitfähigkeiten werden zumeist mit $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ für feuchten Boden und $0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ für trockenen Boden festgelegt. Als Grenzübertemperatur für die Austrocknung werden 15 K Erwärmung des Bodens zur ungestörten Temperatur nach Brakelmann (1985) festgelegt.

Mittels der Finite-Elemente-Modellierung werden auch Einflüsse durch die Wärmeentwicklung benachbarter Anlagen berechnet. Zudem werden die Auswirkungen thermischer Stabilisierungsmaßnahmen und Zwangskühlungen von Kabeln und Kabelgräben über bspw. Wasserrohre auf die Belastbarkeit ermittelt (Brakelmann et al., 2013; Zhang, 2009).

In Koopmans et al. (1989) wurden an Sandböden bodenphysikalische Untersuchungen, Feuchtemessungen im Kabelgraben in den Niederlanden sowie numerische Simulationen durchgeführt. Auf dieser Basis wurden Aussagen über die Austrocknungsgefahr der Böden gegeben. Korrelationen zwischen den thermischen Bodeneigenschaften und dem Regen entlang einer Hochspannungstrasse und Schlussfolgerungen für die Belastbarkeit finden sich in Zhao et al. (2000). Mit der Austrocknung aufgrund des Wasser- und Dampftransportes aufgrund von Temperaturgradienten in der Kabelumgebung beschäftigen sich zahlreiche Autoren (u.a. Millar & Lethonen, 2002; Freitas et al.;1996). In Trinks (2010) wurde ein numerisches Modell für die Berechnung der Belastbarkeit von Erdkabeln in Abhängigkeit des Wasser- und Wärmehaushaltes des Standortes an 110 kV-Kabeln in Berlin validiert, und es wird ein Überblick über Arbeiten zu den Wechselwirkungen zwischen Erdkabeln und deren Umgebung gegeben.

Im Wesentlichen werden in den bisherigen Arbeiten Hoch- und Höchstspannungskabel betrachtet. Ein wesentlicher Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf Bettungen für Mittel- und Niederspannungskabel. Deren Belastbarkeit wird in der Regel nach den im folgenden beschriebenen Methoden und Normen berechnet.

3.1.1 Spiegelungsmethode

Die Spiegelungsmethode bildet in vielen Fällen die Grundlage für die Berechnung der Erwärmung von Kabeln in einer vorgegebenen Verlegetiefe und bei einer vorgegebenen ungestörten Bodentemperatur (u. a. IEC 60287-2-1; 2006, Trinks, 2010). Dabei erfolgt die Anwendung einer Analogie aus der Elektrotechnik. Der Geländeoberkante wird dabei als Dirichlet-Randbedingung eine Temperatur zugeordnet. Daraus ergibt sich als Green'sche Funktion eine Spiegelladung, und eine Linienquelle wird im gleichen Abstand zur Verlegetiefe oberhalb gespiegelt.

Die thermischen Widerstände innerhalb des Kabels bis zum Mantel selbst setzen sich aus den thermischen Materialwiderständen aller Schichten im Kabelaufbau und deren Übergangswiderständen zusammen. In Abbildung 3.1 ist ein vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild für die Kabel-Boden-Interaktion für ein Mittelspannungskabel im stationären Zustand dargestellt. Die thermischen Widerstände der metallischen Aufbauelemente werden aufgrund der niedrigen Werte vernachlässigt, und die Übergangswiderstände werden im Gesamtwiderstand der Schichten und nicht gesondert berücksichtigt (Oeding & Oswald, 2011). Damit verbleiben die drei in Reihe geschalteten thermischen Widerstände R_{th} des Kabelmantels, der Isolierung und des Bodens als maßgebliche Wärmewiderstände.

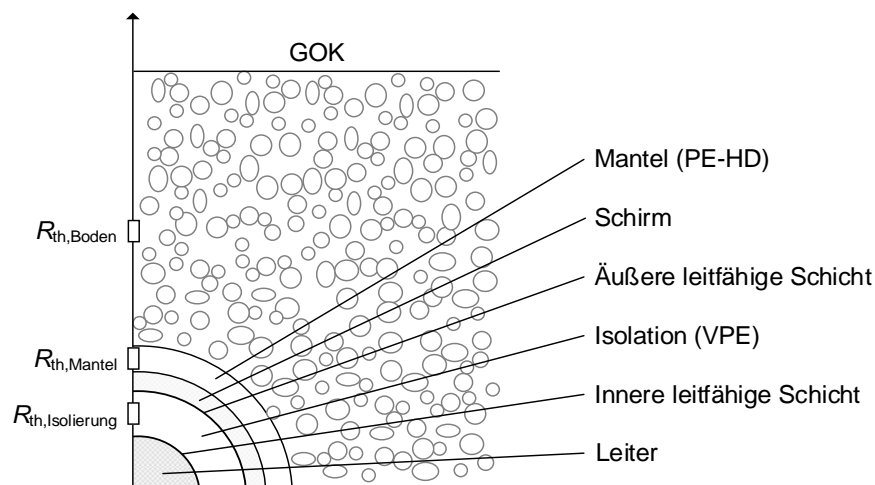


Abbildung 3.1: Thermisches Ersatzschaltbild für ein erdverlegtes Mittelspannungskabel

Die in vergleichsweise engen Grenzen streuenden Wärmeleitfähigkeiten der nichtmetallischen Kabelaufbauelemente von ca. $0,1$ bis $0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ unterliegen nach Lee et al. (2006) thermisch bedingten Veränderungen im Betriebstemperaturbereich von Erdkabeln von maximal 25 %. Veränderungen der Aufheizung und damit auch der Kabeleigenschaften selbst werden deswegen maßgeblich von den Veränderungen der Wärmewiderstände des Bodens beeinflusst. Die Messungen nach Abschnitt 6.3 dieser Arbeit zeigen eine Streubreite

der Wärmeleitfähigkeiten von Böden in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der Verdichtung von 0,2 bis 2,6 Wm⁻¹K⁻¹. Dies entspricht spezifischen Wärmewiderständen von 0,38 bis 5 Km·W⁻¹.

Der spezifische Widerstand $R_{th, spez}$ als Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit ist eine Materialeigenschaft. Als Widerstandsbelag R'_{th} wird der Wärmewiderstand pro Längeneinheit bezeichnet. Dieser Belag ist neben dem spezifischen Wärmewiderstand des Materials von der Querschnittsfläche A des durchströmten Körpers abhängig. Der resultierende Wärmewiderstand des Körpers $R_{th, Körper}$ errechnet sich durch Multiplikation des Widerstandsbelages mit der Länge l des Körpers. Für quaderförmige Körper ergibt sich Gleichung (3.1).

$$R_{th, Körper} = l \cdot R'_{th} = \frac{l}{A} R_{th, spez} \quad (3.1)$$

Die thermischen Widerstandsbeläge und die Temperaturen einzelner rotationssymmetrischer Kabelschichten mit dem äußeren Radius r_a und dem inneren Radius r_i errechnen sich nach Gleichung (3.2) und (3.3).

$$R'_{th, Kabelschicht} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) \quad (3.2)$$

$$T = P'_{V,L} \cdot l^2 \cdot R'_{th, Kabelschicht} + T_0 = \frac{P \cdot l}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right) + T_0 \quad (3.3)$$

$P'_{V,L}$ stellt dabei die für Mittel- und Niederspannungskabel maßgebliche Verlustleistung aus den ohmschen Verlusten pro Längeneinheit nach Abschnitt 2.3.1 und T_0 die ungestörte Bodentemperatur auf Tiefe des Kabels dar. Der thermische Widerstandsbelag des Bodens für ein einziges Kabel wird über die Spiegelungsmethode nach Gleichung (3.4) berechnet. Dabei bezeichnen r_B die Verlegetiefe und r_M den Kabelradius.

$$R'_{th, Boden} = \frac{1}{2\lambda\pi} \cdot \ln\left(\frac{2r_B}{r_M}\right) \quad (3.4)$$

Im Falle einer Kabelhäufung wird in der IEC 60287-2-1, 2006 zwischen berührenden und nicht berührenden Kabeln unterschieden. Ersteres trifft für Dreileiterbündel entsprechend Abbildung 3.2, die oft die Verlegeanordnung von Mittelspannungskabeln darstellen, zu. Letzteres ist bei der Betrachtung von Kabelhäufungen relevant. In der Norm wird die Temperaturerhöhung durch die benachbarten Kabel durch einen Zusatzwiderstandsbelag ausgedrückt. Damit ergibt sich für sich berührenden Kabel in Dreileiteranordnung ein Gesamtbodenwiderstand nach Gleichung (3.5).

$$R'_{\text{th,Boden,Dreileiter}} = \frac{1}{2\pi\lambda} \left\{ \ln \left(2 \frac{2r_B}{r_M} \right) + 2 \ln \left(\frac{2r_B}{r_M} \right) \right\} \quad (3.5)$$

Im Folgenden ist die Berechnung der Temperaturentwicklung für die Leiter eines solchen Dreileiterbündels für verschiedene Bodenwärmewiderstände und eine Verlegetiefe r_B von 70 cm dargestellt. Die in Reihe geschalteten thermischen Widerstände des Kabelaufbaus addieren sich analog zu elektrischen Widerständen (Gleichung 3.6). Für ein Mittelspannungskabel mit einem Querschnitt des Aluminiumleiters von 150 mm² werden die Abmessungen und thermischen Widerstände nach Tabelle 3.1 verwendet.

Tabelle 3.1: Kennwerte zur Berechnung der Kabelerwärmung

Schicht	Radius innen r_i in mm	Radius außen r_a in mm	Thermischer Widerstands- belag R'_{th} in $\text{Km}^{-1}\text{W}^{-1}$
Leiter	0	7	0
Innere leitfähige Schicht	7	7,25	0
Isolation (VPE)	7,25	14	0,3611
Äußere leitfähige Schicht	14	14	0
Schirm	14	14,25	0
Mantel (PE-HD)	14,25	17	0,0669

Für die spezifischen thermischen Widerstände des Bodens wird die Einteilung nach DIN VDE 0276-1000 verwendet:

- 0,7 Km·W⁻¹ (sehr feucht)
- 1,0 Km·W⁻¹ (feucht)
- 2,5 Km·W⁻¹ (trocken)

Die Verlegeanordnung der Kabel ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Es handelt sich um eine typische Anordnung von Mittelspannungskabeln im Kabelgraben. Die Kabelerwärmung ergibt sich nach Gleichung (3.6).

$$T_L = P'_{V,L} \cdot l^2 \cdot (\sum R'_{\text{th,Kabelschicht}} + R'_{\text{th,Boden,Dreileiter}}) + T_0 \quad (3.6)$$

Die eingebrachte Leistung $P'_{V,L}$ pro Längeneinheit entspricht dem Leiterverlust eines Leiters nach Abschnitt 2.3.1. Die verwendete Einheitslänge l ist ein Meter. Die Berechnung bei 20 °C ungestörter Bodentemperatur (Abbildung 3.3) zeigt, dass die spezifischen Bodenwärmewiderstände die Übertragungsleistung deutlich beeinflussen. Geringere spezifische Wärmewiderstände des Bodens ermöglichen signifikant höhere Übertragungsleistungen bis die maximal zulässige Betriebstemperatur von 90 °C erreicht wird. Ähnliche Ergebnisse sind in Trinks (2010) und Balzer & Hinrichsen (2015b) zu finden.

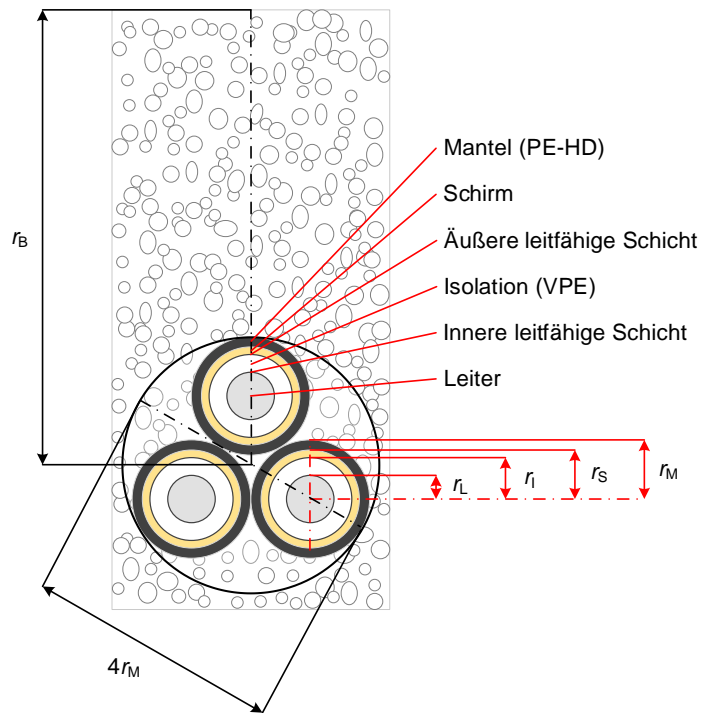


Abbildung 3.2: Anordnung von Mittelspannungskabeln im Boden

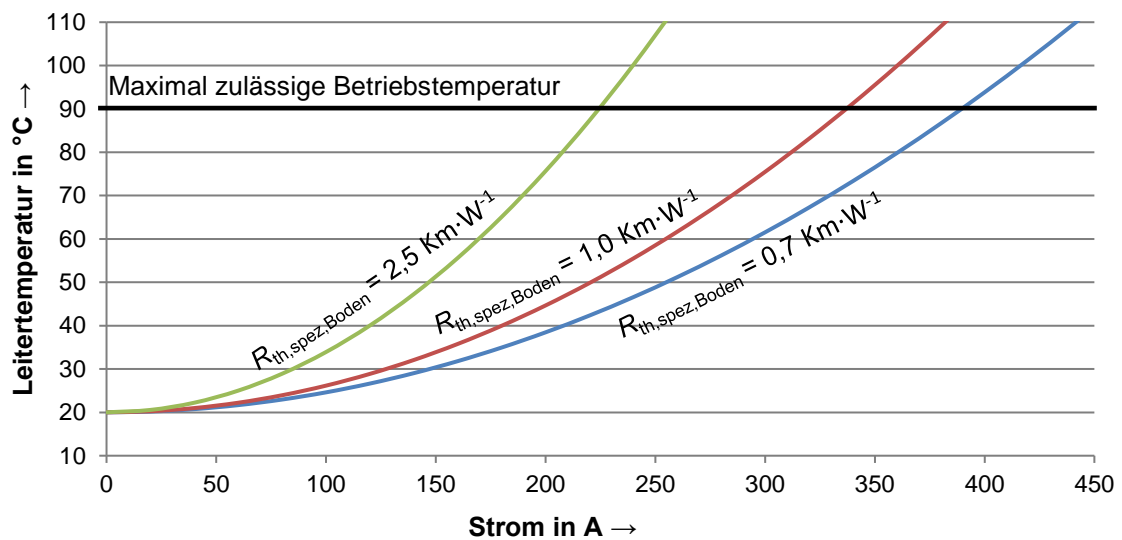


Abbildung 3.3: Erwärmung eines Dreierbündels von Mittelspannungskabeln in 70 cm Tiefe in Abhängigkeit des spezifischen Bodenwärmewiderstandes bei stationärer Bestromung

3.1.2 Anwendung der DIN VDE 0276

In Brakelmann (1985) wird beschrieben, dass der Bodenwärmewiderstand stark von Wasser- und Wasserdampfbewegungsprozessen und einer damit verbundenen, bereichsweisen Austrocknung des Bodens um die erwärmten Kabel beeinflusst wird. Sobald die Grenze der trockenen Zone erreicht ist, beginnt die „feuchte“ Zone, in der der Wassergehalt des Bodens von der Wärme des Erdkabels kaum mehr beeinflusst ist. Die Grenze dieser Zonen wird durch die Isotherme für 15 K Erwärmung des Bodens um die Kabel festgelegt. In niederschlagsarmen Zeitabschnitten kann sich die Austrocknungszone erweitern. Dabei kann es zu einem irreversibel trockenen Bereich kommen, der durch Niederschlag kurzfristig nicht mehr befeuchtet werden kann (Speck, 1994).

Dies wurde in der DIN VDE 0276-1000 in Form eines Zweischnittmodells berücksichtigt. Hierbei betrachten die Teile 603 Starkstromkabel mit Nennspannungen von 0,6/1 kV und Teil 620 Energieverteilungskabel mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen von 3,6 bis 20,8/36 kV. Für Abweichungen der Randbedingungen dieser Normen beinhaltet Teil 1000 Umrechnungsfaktoren, die Unterschiede in der Bodenaustrocknung, dem Belastungsprofil und der Art der Verlegung berücksichtigen.

Im Folgenden wird die Anwendung der Norm nach Sass et al. (2015b) dargestellt. Die verwendeten Begrifflichkeiten werden im Rahmen der Norm DIN VDE 0298, Teil 1 beleuchtet und an dieser Stelle kurz erläutert werden. Im Anschluss daran wird der relevante Inhalt der oben genannten Normen wiedergegeben.

3.1.2.1 Begrifflichkeiten

Die Nennspannung von Starkstromkabeln wird im Allgemeinen in der Form $U_0/U (U_m)$ angegeben, mit:

- U_0 : Effektivwert der Spannungs zwischen Leiter und umgebendem Erdpotential
- U : Effektivwert der Spannung zwischen zwei Leitern eines Dreiphasensystems (verkettete Spannung)
- U_m : Höchster Effektivwert der verketteten Spannung des Systems, für das die Betriebsmittel verwendet werden dürfen.

Hinsichtlich der Strombezeichnungen wird zwischen folgenden Nomenklaturen unterschieden:

- I_b : Belastung im ungestörten Betrieb. Dieser Strom entspricht der im Lastverlauf auftretenden Größtlast (Abbildung 3.4)
- I_r : Bemessungsstrom; Belastbarkeit des Kabels bei den standardisierten Betriebsbedingungen

I_z : Belastbarkeit; der um die veränderten Betriebsbedingungen korrigierte Bemessungsstrom.

Der Zusammenhang zwischen den erwähnten Parametern ist im Folgenden beschrieben. Die Teile 603 beziehungsweise 620 der Norm DIN VDE 0276 beinhalten die Bemessungsströme für genormte Kabeltypen unter Normbedingungen. Bei Abweichungen können dem Teil 1000 Korrekturfaktoren f_1 und f_2 entnommen werden, mit Hilfe derer sich die Belastbarkeit nach Gleichung (3.6) ermittelt.

$$I_z = I_r \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (3.7)$$

Für die Auswahl eines Kabels soll gelten, dass die im Betrieb auftretende Belastung I_b unterhalb der Belastbarkeit I_z liegt. Zur Klassifizierung einer zyklischen Belastung wird in den entsprechenden Normen auf ein Standard-Lastprofil für Energieversorgungsunternehmen zurückgegriffen, wie es in Abbildung 3.4 wiedergegeben wird.

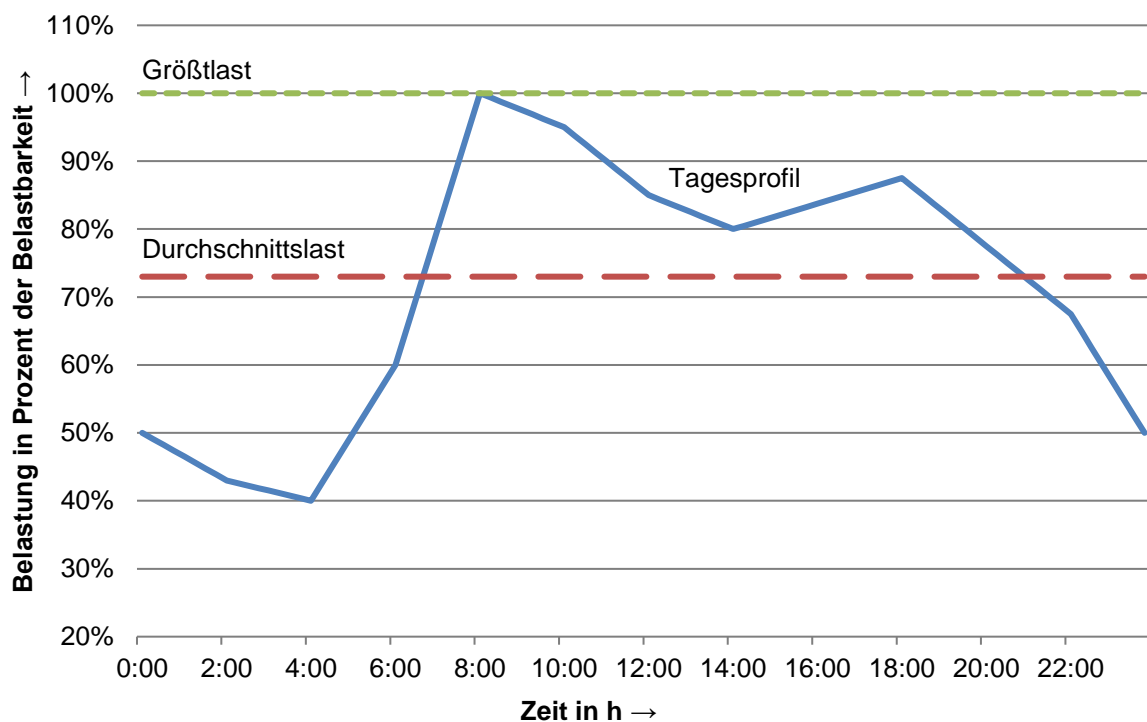


Abbildung 3.4: Standard-Lastprofil aus der Norm VDE 0276

Die eingezeichneten Parameter dieses Lastprofils der Menge von Punkten P_t sind folgendermaßen definiert: die Größtlast ist in Abbildung 3.4 grün gekennzeichnet und stellt nach Gleichung (3.8) den höchsten, während des Tagesprofiles auftretenden Lastgrad dar.

$$\text{Größtlast} = \max(P_t) \quad (3.8)$$

Die Durchschnittslast ist in Abbildung 3.4 in rot gekennzeichnet und stellt nach Gleichung (3.9) das arithmetische Mittel der Last über den Tag dar.

$$\text{Durchschnittslast} = \frac{1}{t_{\max}} \sum_{t_0}^{t_{\max}} P_t \quad (3.9)$$

Der Belastungsgrad m nach Gleichung (3.10) ist der Quotient von Durchschnittslast und Größtlast.

$$m = \frac{\frac{1}{t_{\max}} \sum_{t_0}^{t_{\max}} P_t}{\max(P_t)} \quad (3.10)$$

3.1.2.2 Bemessungsströme

Von Interesse hinsichtlich der Bemessung der Belastbarkeit von Erdkabeln ist Abschnitt 5 der Teile 3 in den Normen DIN VDE 0276, Teil 603 beziehungsweise 620. An dieser Stelle werden die Bemessungsströme für die Randbedingungen nach Tabelle 3.2 angegeben.

Tabelle 3.2: Randbedingungen für die Belastbarkeiten nach DIN VDE 0276

		Teil 603	Teil 620
Temperaturen	Höchste zulässige Betriebstemperatur	70 °C	90 °C
	Höchste Kurzschlussstemperatur für Nennquerschnitt $S_n \leq 300 \text{ mm}^2$	160 °C	250 °C
	Höchste Kurzschlussstemperatur für Nennquerschnitt $S_n \geq 300 \text{ mm}^2$	140 °C	
Erdung	Erdung konzentrischer Leiter	an beiden Enden	
Frequenz	Betriebsfrequenz	50 Hz	
Betriebsbedingungen	Zyklische Belastung, Belastungsgrad	m = 0,7	
	Verlegetiefe	0,7 m	
	Umgebungstemperatur des Bodens	20 °C	
	Spezifischer Wärmewiderstand des Bodens, ausgetrockneter Boden	2,5 Km·W ⁻¹	
	Spezifischer Wärmewiderstand des Bodens, feuchter Boden	1,0 Km·W ⁻¹	

3.1.2.3 Anpassung der Bemessungsströme

Bei Abweichungen von den Normbedingungen aus Tabelle 3.2 ist eine Anpassung der zulässigen Belastbarkeit notwendig. Hierzu enthält der Teil 1000 der Norm Informationen über die Faktoren f_1 und f_2 , die zur Korrektur der Belastbarkeit herangezogen werden müssen.

Prinzipiell müssen die Wechselwirkungen der vier Parameter – die Bodentemperatur, der spezifische thermische Bodenwiderstand, der Belastungsgrad sowie Kabelhäufungen – immer als Ganzes betrachtet werden. Als Kompromiss zwischen einer anwendungsorientierten Beschränkung des tabellarischen Umfangs und einer breiten Abdeckung aller möglichen Betriebszustände wurde die Anzahl der Faktoren auf zwei beschränkt, die folgende Sensitivitäten aufweisen.

f_1 : spezifischer Bodenwärmewiderstand, Belastungsgrad, Bodentemperatur

f_2 : spezifischer Bodenwärmewiderstand, Belastungsgrad, Verlegung und Häufung der Kabel

Dies hat jedoch zur Folge, dass eine Korrektur immer beide Faktoren in Betrachtung ziehen muss, da eine gegenseitige Beeinflussung derselben vorliegt. Eine Berechnung zur Veranschaulichung der Auswirkung verschiedener spezifischer Bodenwärmewiderstände auf die Belastbarkeit von Kabeln ist in Anhang 1 dargestellt.

3.2 Thermische Bodenuntersuchung

3.2.1 Linienquellenverfahren

Das Verfahren zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit nach der Linienquellentheorie wurde von Blackwell (1954) entwickelt. Es basiert auf der Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Aufheizkurve einer unendlich langen zylindrischen Heizquelle bei Beheizung mit konstanter Leistung. Die Steigung der Aufheizkurve ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Materials, in dem sich die Heizquelle befindet. Bei halblogarithmischer Darstellung der Aufheizkurve gegen die Zeit entspricht der Kehrwert der Steigung der Kurve im quasistationären Bereich der Aufheizkurve dem Wert der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Der Bereich der Kontaktwiderstände zwischen Heizquelle und Umgebung ist an der flacheren Anfangssteigung erkennbar. Dieses Verfahren hat für geothermische Messungen breite Anwendung gefunden (von Herzen & Maxwell, 1959; Kristiansen, 1982) und wurde Bodenuntersuchungen in der ASTM D5334 (2008) in den USA normiert. Eine andere Möglichkeit ist die Auswertung der Abkühlkurve nach einer kurzen Beheizung

(Lister, 1979). Ausgangspunkt für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit ist die Linienquellentheorie nach Abschnitt 2.4.2..

Das verwendete Wärmeleitfähigkeitsmessgerät TK 04 (Abbildung 3.5) nähert sich im Messverfahren an die idealisiert unendlich lange Heizquelle mittels einer Nadelsonde von 5 bis 7 cm Länge (Abbildung 3.5, rechts unten) an. Diese wird in die Probe gesteckt und mit konstanter Leistung erhitzt. Ein Thermoelement, das in der Sonde eingebracht ist, registriert die relative Veränderung der Temperatur zum Startwert in der Wärmequelle mit einer Genauigkeit von bis zu $1 \cdot 10^{-3}$ K. Die Veränderung der Temperatur wird aufgezeichnet. Die Aufheizzeit der Sonde wird bei üblichen Messungen auf 80 s festgelegt. Die Auswertung der Aufheizkurve beginnt nach ca. 20 s. Die Heizleistung kann an die erwartete Wärmeleitfähigkeit des Materials angepasst werden. Reproduzierbare Ergebnisse können schon bei Aufheizungen von einem Kelvin erreicht werden.



Abbildung 3.5: TK 04 Messgerät (links), Halbraum- (rechts oben) und Vollraumsonden (rechts unten)

Zusätzlich kann eine Halbraumlinienquelle an den Datenlogger angeschlossen werden, die auf eine Probe gelegt oder in einer lockeren Probe vergraben wird. Die Linienquelle ist bei dieser Sonde in einen Plexiglasblock (Abbildung 3.5, rechts oben) eingeklebt, so dass sie auf der Grenzfläche zweier Halbräume (Plexiglas und Probe) aufliegt. Da die Wärmeleitfähigkeit des Plexiglasblockes bekannt ist, kann die Wärmeleitfähigkeit des anderen Halbraumes, der Probe, berechnet werden. Eine richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit kann direkt weder mit der Halbraumlinienquelle noch mit der Vollraumlinienquelle bestimmt werden. Das Ergebnis der Auswertung ist die Integration der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Quellenachse am Ort der Temperaturmessung. Die Auswertungsmethode ist in Erbas (2001) beschrieben. Auch die Eindringtiefe des Temperaturfeldes ist vor der Messung nicht exakt ermittelbar, da sie von der

Temperaturleitfähigkeit des Materials abhängt. Deswegen ist diese Art der Messungen nur für homogene oder gleichmäßig heterogene Proben geeignet.

Für die Untersuchung von Bettungsmaterialien im Kabeltrassenbau wurden Nadelsonden u. a. in den Arbeiten von Trinks (2010) verwendet. Dort wurden die Wärmeleitfähigkeitsmesswerte der Böden den Wassergehalten zugeordnet. Getrennt davon wurden die Saugspannungen der Böden in Bezug auf die Wassergehalte gemessen. Anschließend wurden die Wärmeleitfähigkeitsmesswerte über die Wassergehalte auch den Saugspannungen zugeordnet. Eine Weiterentwicklung dieses Verfahrens ist in Abschnitt 5.4 dieser Arbeit dargestellt. Außerdem wurden Nadelsonden in Winkler (1971) verwendet. Dort wurde eine Nadelsonde in die Mitte eines Topfes installiert. Um die Sonde wurde der Boden eingebaut und händisch definiert verdichtet. An den verdichteten Bodenproben wurde die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Dichte bestimmt. In Abschnitt 8 ist eine Methode dargestellt mit dem solche Messungen auf Basis einer Abwandlung des im folgenden beschriebenen Divided-Bar-Verfahrens automatisiert bei verschiedenen Verdichtungsstufen durchgeführt werden können.

3.2.2 Divided-Bar-Verfahren

Das Divided-Bar-Verfahren (Abbildung 3.6) wurde bereits von Benfield (1939) für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Felsproben benutzt. Weitere Anwendungen und ein Vergleich der Messergebnisse des Divided-Bar-Verfahrens mit dem Linienquellenverfahren sind in Beck (1957) und Sass et al. (1984) beschrieben. Dabei werden vergleichbare Ergebnisse bei der Messung von Festgesteinen im Bereich der Wärmeleitfähigkeiten von 1,4 bis $5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ mit beiden Verfahren erzielt. Es handelt sich um ein stationäres Messverfahren, das die unbekannte Wärmeleitfähigkeit der Probe mit der bekannten Wärmeleitfähigkeit von Referenzkörpern vergleicht. Die Probe wird für die Messung in dem Gerät zwei Glaskörpern bekannter Wärmeleitfähigkeit sowie einer Heizung und einer Kühlung platziert. Aufgrund des Temperaturgefälles bildet sich ein Wärmestrom aus, der sowohl durch die Glaskörper als auch durch die Probe fließt.

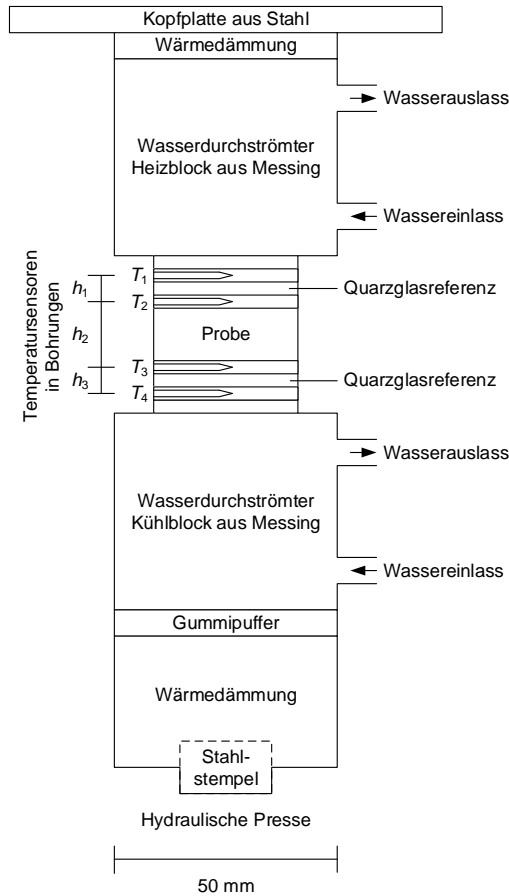


Abbildung 3.6: Divided-Bar-Verfahren (verändert nach Pribnow & Sass, 1995)

Eine radiale Wärmedämmung des Stapels wird auf Basis von numerischen Modellierungen der Wärmeflüsse im Gerät in Jones & Pascal (1993) empfohlen. Hierdurch wird insbesondere bei inhomogenen Proben eine Homogenisierung der Temperaturen in der Messebene erreicht. Im stationären Zustand werden die Temperaturen mit Thermoelementen in Messingplatten an der Oberkante des oberen Glaskörpers T_1 , an der Unterkante des oberen Glaskörpers (Oberkante der Probe) T_2 , an der Oberkante des unteren Glaskörpers (Unterkante der Probe) T_3 und an der Unterkante des unteren Glaskörpers T_4 gemessen. Damit sind die Wärmestromdichten \dot{q} in allen Glaskörpern und der Probe gleich und berechnen sich nach Gleichung (3.11).

$$\dot{q} = -\lambda_u \frac{T_1 - T_2}{h_1} = -\lambda_s \frac{T_2 - T_3}{h_2} = -\lambda_l \frac{T_3 - T_4}{h_3} \quad (3.11)$$

Die Auswertung erfolgt nach Clauser (2002) über die bekannten Wärmeleitfähigkeiten des oberen λ_u und unteren Glaskörpers λ_l . Die Wärmeleitfähigkeit von Festgesteinsproben λ_s wird dann nach Gleichung (3.12) berechnet.

$$\lambda_s = \frac{h_2}{2(T_2 - T_3)} \left(\lambda_u \frac{T_1 - T_2}{h_1} + \lambda_l \frac{T_3 - T_4}{h_3} \right) \quad (3.12)$$

Im Gerät treten mindestens 8 Wärmeübergangswiderstände an den Oberflächen der Messingplatten sowie zusätzliche Übergangswiderstände zwischen den Thermoelementen und den Bohrlochwänden in den Messingplatten auf. Da diese Widerstände u. a. von der Oberflächenstruktur beeinflusst werden und nicht exakt definiert sind führen sie neben den Messunsicherheiten aus der Temperaturmessung zu zusätzlichen Unsicherheiten.

3.2.3 Thermoscanner

Das Optical Scanning Verfahren nach Popov et al. (1983) ist ein kontaktloses Verfahren zur Messung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von festen Proben. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Verfahren liefert es neben dem integralen Messwert individuelle Wärme- und Temperaturleitfähigkeiten einzelner Oberflächenabschnitte und ermöglicht so einen Überblick über die Homogenität der thermischen Materialeigenschaften. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Die Proben sowie zwei Standards, einer vor und einer hinter den Proben, werden auf das Gerät aufgelegt. Darunter fährt eine fokussierte Wärmequelle in Form einer Glühlampe, die mit einer Konstantstromquelle bestrahlt wird, mit konstanter Geschwindigkeit entlang und erhitzt die Probenoberfläche. Um Auswirkungen auf die Messwerte durch Albedo-Effekte zu vermeiden, wird die Messfläche der Probe zuvor mit schwarzem Lack beschichtet.

Zwei Infrarot-Thermosensoren bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit und somit gleichem Abstand vor und hinter der Wärmequelle und scannen die Oberflächentemperatur der Probe sowie der Standards vor und nach der Erhitzung. Die Wärmeleitfähigkeit der Probe bewirkt einen Abtransport der an der Oberfläche aufgebrachten Energie in den Kern der Probe. Je größer die Wärmeleitfähigkeit der Probe ist, desto niedriger ist die Oberflächentemperatur, nachdem der Erhitzungsvorgang abgeschlossen ist.

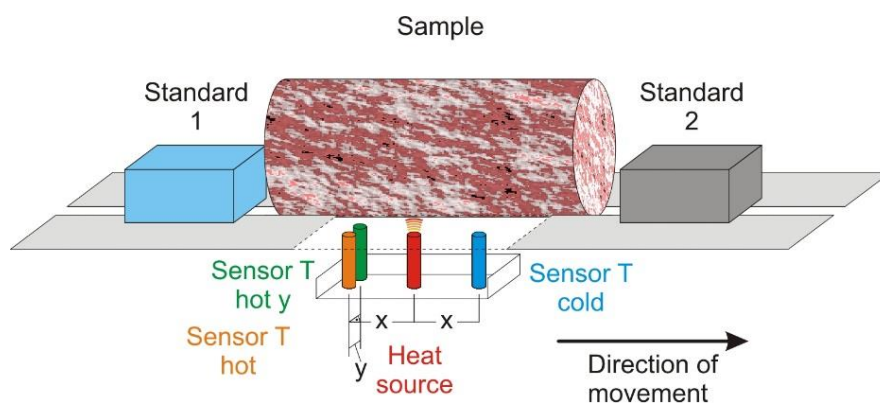


Abbildung 3.7: Schematischer Aufbau des Thermoscanners (www.geo.tu-darmstadt.de)

Die Erwärmung der Probe beträgt wenige Grad Celsius. Der maximale Temperaturanstieg entspricht Gleichung (3.13).

$$\Delta T = \frac{P}{2\pi \cdot x \cdot \lambda} \quad (3.13)$$

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit λ aus den Messwerten erfolgt durch den Vergleich der Temperaturdifferenzen der Probe ΔT mit denen der Standards ΔT_R bekannter Wärmeleitfähigkeit λ_R nach Gleichung (3.13). Dabei sollen die Standards eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit wie die zu erwartende Wärmeleitfähigkeit der Probe besitzen.

$$\lambda = \lambda_R \cdot \left(\frac{\Delta T_R}{\Delta T} \right) \quad (3.14)$$

Die Auswahl des Messbereichs einer Probe erfolgt am Ende des Messvorgangs manuell, um Randeffekte zu eliminieren, bestimmte Bereiche von der Messung auszuschließen und um bestimmte Probenbereiche hinsichtlich Inhomogenitäten separat zu betrachten. Der Messbereich liegt zwischen 0,2 und 25 Wm⁻¹K⁻¹, und die Messabweichung beträgt nach Herstellerangaben unter 3 %. Die Mindestprobenbreite beträgt 3 cm und die maximale Probenlänge 80 cm. Um Wärmereflektionen von den Probenrändern während der Messung auszuschließen, beträgt die Mindestprobendicke 1 cm. Die Temperaturleitfähigkeit kann ebenfalls mit dem Thermoscanner in einem anderen Messmodus bestimmt werden, indem zur Aufzeichnung der Temperatur der erwärmten Probe ein zweiter Temperatursensor zugeschaltet wird, der senkrecht zur Bewegungsrichtung um wenige Millimeter in y-Richtung verschoben ist (Abbildung 3.7).

Das Optical Scanning Verfahren ist eine der Standardmethoden für die Messung an Festgesteinsproben am Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt (Bär, 2012).

3.3 Anwendung von Berechnungsmodellen

Die Bestimmung des Wärmeflusses im Untergrund ist seit mehreren Jahrhunderten für technische und naturwissenschaftliche Fragestellungen von Interesse. Während die Hauptmotivation für die ersten Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit von Böden am Ende des 19. Jahrhunderts darin bestand, die Wärmeströme aus dem Erdinneren nachzuvollziehen, rückten zu Beginn des 20. Jahrhunderts zunehmend technische Fragestellungen in den Vordergrund. Es wurde u. a. versucht, Korrelationen zwischen den thermischen Kennwerten und dem Verbrennungsverhalten und der Qualität von Kohle (Fritz & Diemke, 1940) zu ermitteln. Zudem wurden Korrelationen für die Ermittlung des Wassergehaltes

aus der Wärmeleitfähigkeit sowie der Bodentemperaturen für biologische Fragestellungen (Albrecht, 1949) erstellt.

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts wurden auf Basis von Messungen, die zumeist mittels Nadelsonden, aber auch nach dem Divided-Bar-Verfahren und mit Plattengeräten durchgeführt wurden, Berechnungsmodelle zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit aus anderen bodenmechanischen Parametern entwickelt. Das erste Berechnungsmodell für Boden-Wasser-Luft-Gemische wurde von Kersten (1949) für zwei Bodenarten (Sandböden und feinkörnige Böden) mit den Eingangsparametern Wassergehalt und Trockenrohdichte als empirisches Modell erstellt. Weitere Entwicklungen folgten von Mickley (1951), Gemant (1952) und van Rooyen & Winterkorn (1959), Johansen (1975) und Salomone (1984). De Vries (1963) ergänzte die Berechnungsmodelle um die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Böden. Das de Vries-Modell wurde von Campbell et al. (1994) weiterentwickelt und verfeinert. Hopmans & Dane (1986) entwickelten ebenfalls ein temperaturabhängiges Modell, und Tarnawski (2000) erweiterte das Kersten-Modell um die Temperatur. Modellverfeinerungen bei Raumtemperatur mit speziellem Fokus wie z. B. auf den Einfluss von hohen Anteilen an Feinstkorn oder organischen Bestandteilen auf die Wärmeleitfähigkeit wurden in neuerer Zeit von Côté & Konrad (2005) und Lu et al. (2007) etabliert.

Zusammenfassungen und Erläuterungen zu den Modellansätzen finden sich u. a. in Farouki (1986) und Sanner (1992). Die bisher in den Untersuchungen variierten Parameter sind Wassergehalt, Trockenrohdichte, Korngröße, Humusgehalt, Mineralien, Kornform und Temperatur.

Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Böden zur Planung von Erdwärmekollektoranlagen wird weiterhin oft das Modell nach Kersten (1949) angewendet. Die statistische Abweichung der Rechenwerte zu Messwerten beträgt bei diesem Modell 25 %. Der Aufwand für die Bestimmung der Eingangsparameter für die anderen Modelle, die statistische Abweichungen von 10 % aufweisen können, ist aber sehr hoch (Dehner et al. 2007).

Bei Anwendung geeigneter Messverfahren ist der Aufwand für die direkte Messung der Wärmeleitfähigkeit wesentlich geringer als für die Bestimmung der Eingangsparameter für die rechnerische Ermittlung. Die rechnerische Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von erhitzten und verdichteten Böden bei verschiedenen Wassergehalten, aufbauend auf Messwerten bei Raumtemperatur bei mindestens drei Wassergehalten nach Campbell et al. (1994), stellt eine Alternative zu Messungen unter Variation aller genannten Parameter dar.

Außerdem wurden Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit von reinen Boden-Wasser-Gemischen ohne die dritte Phase, die Bodenluft (Krischer, 1934; McGaw, 1969; Huber, 2013),

durchgeführt. Hierauf aufbauend wurden u. a. Rechenmodelle zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit auf Basis der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Komponenten unter Variation der Volumenanteile entwickelt. Berechnungsmethoden für Zwei-Komponenten-Gemische sowie das Modell nach Campbell et al. (1994) werden im Folgenden beschrieben.

3.3.1 Wärmeleitung in Zwei-Komponenten/Phasen-Gemischen

Als Zwei-Komponenten-Gemische im Hinblick auf die Anwendung der nachfolgend dargestellten Berechnungsmethoden können reine Wasser-Feststoffgemische, Luft-Feststoff-Gemische, aber auch Boden-Stein-Gemische und Boden-Organik-Gemische gesehen werden. Da es nicht immer zweckmäßig ist, jede mögliche Mischungsvariante herzustellen und messtechnisch zu untersuchen, ist es notwendig, ein Berechnungsmodell für die Wärmeleitfähigkeit solcher Gemische aus den Wärmeleitfähigkeiten ihrer Bestandteile für verschiedene Mischungsverhältnisse herzuleiten.

Auch die Wärmeleitfähigkeit des Bodenwassers selbst wird neben der Temperatur (Abschnitt 3.3.2) von der Feststofffracht beeinflusst. In Böden, in denen Korn-zu-Korn-Kontakte überwiegen, wird aufgrund von Reibung stetig feinkörniges Material gebildet. Durch wiederholtes Austrocknen sammelt sich davon eine größere Menge in der unmittelbaren Nähe der Kornkontaktstellen an (Blume et al., 2010). Dies verändert die Wärmeleitfähigkeit der Menisken des Bodenwassers im feuchten Zustand, sowie die Wärmeleitfähigkeit der Kontaktflächen im getrockneten Zustand (Abbildung 3.8).

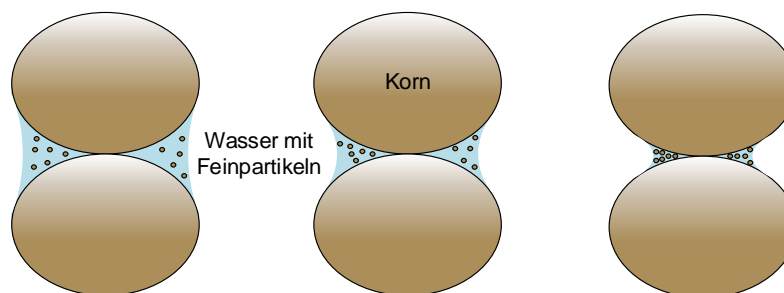


Abbildung 3.8: Anlagerung von Reibungsmaterial durch Austrocknung (verändert nach Rigole & de Bisschop, 1972)

In der Literatur finden sich mehr als 50 Modelle für die Vorausberechnung der Wärmeleitfähigkeit von Stoffgemischen (VDI-GVC (Hrsg.), 2013). Es werden drei Modelle, die in der Geothermie gebräuchlich sind (Farouki, 1986; Sass et al., 2015a), vorgestellt. Eine Anwendung der Modelle an Messwerten erfolgt in Abschnitt 6.

3.3.1.1 Schichtmodell

Die Wärmeleitfähigkeit von Materialmischungen kann nach Wiener (1912) zwischen zwei Extremwerten variieren. Ihr Wert wird minimal, wenn die thermischen Widerstände der einzelnen Phasen bzw. Komponenten in Reihe geschaltet und maximal, wenn sie parallelgeschaltet sind.

Der erste Extremfall, die Wärmeleitfähigkeit λ_{Reihe} in Reihe geschalteter Materialien berechnet sich aus der Wärmeleitfähigkeit λ_{Ma} der Matrix und λ_{Po} der Porenfüllung mit dem Porenanteil n als Wichtungsfaktor nach Gleichung (3.14).

$$\lambda_{\text{Reihe}} = \frac{\lambda_{\text{Po}}}{\frac{\lambda_{\text{Po}}}{\lambda_{\text{Ma}}} \cdot (1 - n) + n} \quad (3.15)$$

Der zweite Extremfall ist die Parallelschaltung von Matrix und Porenfüllung. Die Wärmeleitfähigkeit der parallel geschalteten Schichten $\lambda_{\text{parallel}}$ berechnet sich nach Gleichung (3.15).

$$\lambda_{\text{parallel}} = \lambda_{\text{Ma}}(1 - n) + \lambda_{\text{Po}} \cdot n \quad (3.16)$$

Die Extremfälle führen zu zwei Grenzkurven, innerhalb derer die Wärmeleitfähigkeit des Materials liegen muss. Anhand von Messergebnissen an wassergesättigten und ofentrockenen Böden wurde von Krischer (1934) der Mittelwert aus beiden Extremfällen nach Gleichung (3.19) für die näherungsweise Berechnung der Wärmeleitfähigkeit vorgeschlagen.

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{Reihe}} + \lambda_{\text{parallel}}}{2} \quad (3.17)$$

3.3.1.2 Dispersionsmodell

Das Dispersionsmodell nach Gleichung (3.18) bis (3.20) wurde von Hashin & Shtrikman (1962) entwickelt. Dieses Zwei-Phasen-Modell geht von einer Kugelform der einen Phase aus, die in eine Matrix der anderen Phase eingebettet ist. Im einen Extremfall kann die Matrix durch die feste Phase repräsentiert sein und die Kugeln durch die flüssige Phase, im anderen Extremfall kann die feste Phase durch die Kugeln und die flüssige Phase durch die Matrix dargestellt werden. Die beiden Extremfälle werden oberer und unterer Extremfall genannt.

Da die reelle Wärmeleitfähigkeit des Zwei-Phasen-Gemisches immer zwischen dem oberen und dem unteren Extremfall liegen muss, wird zur Berechnung der arithmetische Mittelwert aus beiden mit dem Porenraum n als Wichtung verwendet.

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{ober}} + \lambda_{\text{unter}}}{2} \quad (3.18)$$

$$\lambda_{\text{ober}} = \lambda_{\text{Ma}} + \frac{n}{\frac{1}{\lambda_{\text{Po}} - \lambda_{\text{Ma}}} + \frac{1-n}{3\lambda_{\text{Ma}}}} \quad (3.19)$$

$$\lambda_{\text{unter}} = \lambda_{\text{Po}} + \frac{1-n}{\frac{1}{\lambda_{\text{Ma}} - \lambda_{\text{Po}}} + \frac{n}{3\lambda_{\text{Po}}}} \quad (3.20)$$

3.3.1.3 Modell des geometrischen Mittels

Dieses Modell wurde von Woodside & Messmer (1961a, b) aus empirischen Messungen abgeleitet. Um ein Modell mit möglichst weitem Geltungsbereich zu entwickeln, wurden Messungen mit Porenfüllungen aus Luft, Öl und Wasser ausgewertet. Aus den gewonnenen Messkurven wurde als Richtwert zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Zwei-Phasen-Gemisches der Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit der Matrix und der Porenfüllung mit dem Porenraum n als Wichtung herangezogen. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung (3.21).

$$\lambda_{\text{Geo}} = \lambda_{\text{Ma}}^{(1-n)} \cdot \lambda_{\text{Po}}^n \quad (3.21)$$

Die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten variieren mit den eingesetzten Rechenmodellen. Ein Vergleich der Ergebnisse wird in Abschnitt 6 an Messwerten gegeben.

3.3.2 Wärmetransport in Drei-Phasen-Systemen

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser steigt mit der Temperatur. Eine sogenannte scheinbare Wärmeleitfähigkeit durch Wasserdampf, der sich in Bodenporen befindet, steigt ebenfalls mit der Temperatur. Für Böden mit wasserdampfgesättigter Bodenluft ergibt sich eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens mit der Temperatur (Abbildung 3.9), die bei 62,5 °C der Wärmeleitfähigkeit des wassergesättigten Bodens entspricht (de Vries, 1963).

Die Bodenluft in teilgesättigten Bodenporen bleibt bis zum permanenten Welkepunkt, ab dem kein pflanzenverfügbares Wasser mehr zur Verfügung steht (1,5 MPa Wasserspannung), zu 95 % wassergesättigt. Höhere Wasserspannungen treten im Unterboden normalerweise nicht auf. Im Oberboden, und hier nur in den obersten 2 cm, können im humiden Klimabereich größere Wasserspannungen und damit niedrigere Wassergehalte der Bodenluft auftreten (Blume et al., 2010).

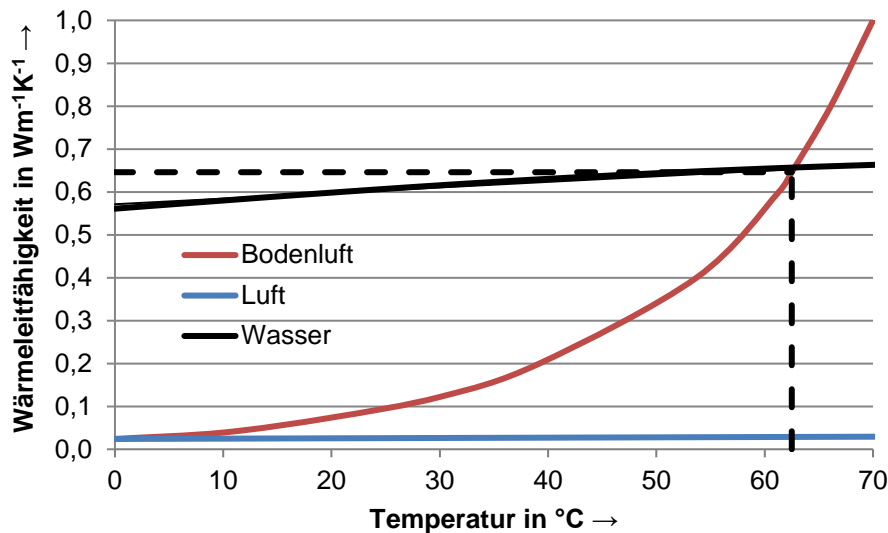


Abbildung 3.9: Wärmeleitfähigkeit von Wasser, wassergesättigter Bodenluft und Luft bei Atmosphärendruck (de Vries, 1963)

Ebenso verändern sich die Wärmetransporteigenschaften des Bodens beim Gefrieren. Beim Phasenübergang des Wassers zu Eis findet ein Sprung in der Wärmeleitfähigkeit statt. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser beträgt $0,56 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei 0°C , die von Eis beträgt $2,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei 0°C . Mit sinkender Temperatur steigt die Wärmeleitfähigkeit des Eises weiter an. In Alexiades & Solomon (1993) wurde eine empirische Formel zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Eis in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt. In Anbergen (2014) wurde die Formel für die Verwendung von Eingabeparametern in der Einheit Grad Celsius nach Gleichung (3.21) umgerechnet, und die Ergebnisse wurden mit den Messwerten von Slack (1980) verglichen. Hierbei zeigten sich gute Übereinstimmungen. Die resultierende Wärmeleitfähigkeit einer Boden-Eismischung kann aus den Wärmeleitfähigkeiten der Komponenten näherungsweise über das Modell des geometrischen Mittels (Abschnitt 3.3.2.3) berechnet werden (Mottaghy & Rath, 2006).

$$\lambda_{\text{Eis}} = 2,240 - 5,975 \cdot 10^{-3} \cdot T^{1,156} \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (\text{für } T \leq 0^\circ\text{C}) \quad (3.22)$$

In Campbell et al. (1994) wurde ein Rechenmodell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von verdichteten und erhitzten Böden auf Basis von Messungen bei Raumtemperatur entwickelt. Dieses auf dem Modell von de Vries (1963) basierende Rechenmodell besteht aus einer Mischung von physikalischen Bodenkennwerten und empirischen Faktoren und wird im Folgenden beschrieben.

Wie bereits beschrieben, stellen Böden eine Mischung von Wasser, Bodenluft und Matrix, bestehend aus Gesteinsbruchstücken bzw. Mineralien mit variierenden Volumenanteilen dar. Die Bodenwärmeleitfähigkeit kann demnach nach Gleichung (3.23) berechnet werden.

$$\lambda = \frac{k_w x_w \lambda_w + k_a x_a \lambda_a + k_m x_m \lambda_m}{k_w x_w + k_a x_a + k_m x_m} \quad (3.23)$$

Mit:

k Gewichtungsfaktoren

x Volumenanteile

λ Wärmeleitfähigkeiten

Die Indizes w, a, m stehen für Wasser, Bodenluft und Matrix. Dabei stellt λ_a die scheinbare Wärmeleitfähigkeit der Bodenluft aus der Summe der Konduktion in den Poren und dem Latentwärmetransport durch Verdampfung und Kondensierung dar. Da die Tortuosität des Porenraumes, die u. a. den Transportweg für den Dampf beschreibt, unbekannt ist, wird durch die Einführung der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit, die den Dampftransport beinhaltet, die Berechnung des Wärmetransportes handhabbarer gemacht. Änderungen im Latentwärmetransport sind maßgeblich für die temperaturbedingte Änderung der scheinbaren Wärmeleitfähigkeit des Bodens verantwortlich.

Die Gewichtungsfaktoren k wurden von de Vries (1963) empirisch durch Messungen der Wärmeleitfähigkeiten von bodenluft- und wasserdominierten Wärmetransportsystemen bestimmt und von Campbell et al. (1994) zu einer stetigen Funktion weiterentwickelt. Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren k über den gesamten Wassergehaltsbereich wird eine Fluidwärmeleitfähigkeit λ_f nach Gleichung (3.24) definiert.

$$\lambda_f = \lambda_a + f_w(\lambda_w - \lambda_a) \quad (3.24)$$

Der Faktor f_w nach Gleichung (3.25) reicht von 1 für wassergesättigten Boden bis 0 für trockenen Boden.

$$f_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_w}{x_{w0}}\right)^{-q}} \quad (3.25)$$

Mit:

x_{w0} Grenzwassergehalt für die Wasserbewegung in Poren

q Intensität der Beeinflussung der Bodenwärmeleitfähigkeit durch den Wassergehalt

Die Intensität q ist nach Gleichung (3.26) aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Viskosität und Benetzungseigenschaften des Wassers temperaturabhängig.

$$q = q_0 \left(\frac{T_K}{303} \right)^2 \quad (3.26)$$

Mit:

q_0 Faktor für die Beeinflussung der Bodenwärmeleitfähigkeit durch den Wassergehalt

T_K Temperatur in Kelvin

Unter Verwendung von Gleichung (3.24) werden die Gewichtungsfaktoren nach Gleichung (3.27) bis (3.29) berechnet.

$$k_a = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_f} - 1 \right) g_a} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_f} - 1 \right) g_c} \right] \quad (3.27)$$

$$k_w = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_f} - 1 \right) g_a} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_f} - 1 \right) g_c} \right] \quad (3.28)$$

$$k_m = \frac{1}{3} \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_f} - 1 \right) g_a} + \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_f} - 1 \right) g_c} \right] \quad (3.29)$$

g_a , g_b , g_c stellen hierbei Formfaktoren für die Kornform dar. Diese Formfaktoren wurden von de Vries bestimmt. Der Wert der Summe der Formfaktoren ist nach Campbell et al. (1994) immer konstant, und für ellipsoidale Partikel gilt $g_a = g_b$.

Da nicht jeder Partikel im Boden untersucht werden kann, wird nach diesem Modell von einer ellipsoidalen Form ausgegangen.

Damit ergibt sich $g_c = 1 - g_a$ und es muss nur noch ein Formfaktor gefunden werden. Da ein signifikanter Einfluss der Formfaktoren auf die errechnete Bodenwärmeleitfähigkeit nur im trockenen Zustand besteht, wird dieser Faktor als empirischer Wert aus trockenen Bodenmessungen ermittelt.

Im Bereich der um Erdkabel vorherrschenden Temperaturen ergeben sich sehr geringe Veränderungen in der Wärmeleitfähigkeit der Minerale, weswegen hierfür kein temperaturabhängiger Term eingeführt werden wird.

Die Berechnung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Bodenwassers λ_w erfolgt ebenso wie die der trockenen Bodenluft λ_{da} nach Gleichung (3.30) und (3.31).

$$\lambda_w = 0,554 + 2,24 \cdot 10^{-3}T - 9,87 \cdot 10^{-6}T^2 \quad (3.30)$$

$$\lambda_{da} = 0,024 + 7,73 \cdot 10^{-5}T - 2,6 \cdot 10^{-8}T^2 \quad (3.31)$$

Der Term zur Berechnung von λ_w wird nur bis 100 °C angewandt, da bei darüberhinausgehenden Temperaturen der Boden trocken ist.

Die scheinbare Wärmeleitfähigkeit λ_a der feuchten Bodenluft setzt sich aus dem Term λ_{da} für die trockene Bodenluft und einem Term für den Dampftransport zusammen. De Vries berechnete den Dampftransportterm λ_v nach Gleichung (3.32).

$$\lambda_v = \frac{H_v \bar{p} D_v s}{P - p^*} \quad (3.32)$$

Mit:

H_v molare Verdampfungsenthalpie von Wasser

\bar{p} molare Dichte von Luft

D_v Dampfdiffusivität in Luft

P atmosphärischer Druck

p^* Sättigungsdruck des Wassers in der Pore

s Anstieg des Wasserdampfdruckes mit der Temperatur

Der Term $1/(P - p^*)$ ist der Faktor für den Massenfluss, der mit dem Anstieg der Dampfmasse an der Partikeloberfläche durch Verdunstung ansteigt und die Wegbewegung des Dampfes von dieser Oberfläche bewirkt.

Direkte Temperaturabhängigkeit besteht für die Variablen \bar{p}, D_v, s, p^* . Zusätzlich besteht Druckabhängigkeit für \bar{p} und D_v . Die Variablen werden nach Gleichung (3.33) bis (3.36) bestimmt.

$$\bar{p} = \bar{p}_0 \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{T_{K0}}{T_K} \right) \cdot \text{mol m}^{-3} \quad (3.33)$$

$$D_v = \left(\frac{P_0}{P} \right) \left(\frac{T_K}{T_{K0}} \right)^{1,75} \cdot \text{sec}^{-1} \text{ m}^2 \quad (3.34)$$

$$p^* = 101.325 \cdot 10^{13,3016t - 2,042t^2 + 0,26t^3 + 2,69t^4} \text{ Pa} \quad (3.35)$$

$$s = dp^*/d\theta = 373,15p^* \frac{13,3015 - 4,082t + 0,78t^2 + 10,76t^3}{T_K^2} \frac{\text{Pa}}{\text{K}} \quad (3.36)$$

Dabei ist $t = 1 - 373,15/\theta$ die dimensionslose Temperatur und $T_K = T + 273,16$ die Temperatur in Kelvin. P_0 ist der Atmosphärendruck in Höhe des Meeresspiegels (101.325 Pa) und $T_{K0} = 273,15$ K.

Die Verdampfungsenthalpie des Wassers errechnet sich nach Gleichung (3.37) mit T in Kelvin.

$$H_v = (45.144 - 48T) \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad (3.37)$$

Der Wassergehalt im Boden sinkt mit steigender Saugspannung. Mit sinkendem Wassergehalt des Bodens sinkt auch der Dampftransport durch die Poren. Für das Aufrechterhalten des Dampftransportes in den Poren muss das kondensierte Wasser wieder zum Ursprungsort zurückfließen können. Die teilgesättigte Wasserleitfähigkeit sinkt mit sinkendem Wassergehalt, weil der leitfähige Querschnitt abnimmt. Ab einem korn- und porengrößenbedingten Grenzwassergehalt stoppt deswegen der Wasserrückfluss vollständig.

Unter Einbezug dieser Faktoren wurde Gleichung (3.38) zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der feuchten Bodenluft λ_a entwickelt.

$$\lambda_a = \frac{H_v h \bar{p} f_w D_v s}{P - h p^*} \quad (3.38)$$

Das Einsetzen der vorangegangenen Gleichungen in Gleichung (3.22) ermöglicht die Berechnung der Bodenwärmeleitfähigkeit für verschiedene

- Wassergehalte,
- Dichten und
- Temperaturen.

Es werden hierfür vier Parameter benötigt:

λ_m Wärmeleitfähigkeit der Minerale

x_{w0} Grenzwassergehalt für die Wasserbewegung in Poren

q_0 Intensität der Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit durch den Wassergehalt

g_a Formfaktor für die Kornform

Die Wärmeleitfähigkeit von trockenen Böden wird maßgeblich von g_a bestimmt, und die Wärmeleitfähigkeit bei bestimmten Wassergehalten von λ_m . Der Übergangspunkt wird durch x_{w0} festgelegt (Campbell, 1994). An den Messergebnissen der bayerischen Böden (Abschnitt 6.3) wird dieses Rechenmodell angewendet, indem die Rechenwerte über eine Parameteranpassung an die Messwerte bei Raumtemperatur angepasst werden. Unter Verwendung der so gewonnenen Parameter werden die Wärmeleitfähigkeiten der Böden für verschiedene Temperaturen und Dichten berechnet.

4 METHODIK DER BEPROBUNG

4.1 Beurteilung der Kennwerte

Das Messkonzept für die Untersuchung der thermischen Transporteigenschaften von Lockergesteinen bzw. Böden ist immer abhängig von dem jeweils zu planenden oder zu untersuchenden Aufbau des Wärmeerzeugers, also Typ, Querschnitt und Anordnung der Kabel. Es werden deswegen die Anforderungen an die thermische Bodenuntersuchung für typische Anwendungen beschrieben.

4.1.1 Offshore-Energiekabel

An der Oberfläche des Meeresbodens über Seekabeln muss das vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) aufgestellte „Zwei-Kelvin-Kriterium“ eingehalten werden, das „auf Basis des derzeitigen Wissenstandes mit hinreichender Wahrscheinlichkeit sicherstellt, dass erhebliche negative Auswirkungen der Kabelerwärmung auf die Natur bzw. die benthische Lebensgemeinschaft vermieden werden“ (Merck, 2006). Danach darf der Meeresgrund um Seekabel 30 cm unterhalb der Meeresbodenoberfläche um nicht mehr als 2 Kelvin erwärmt werden. Da Seekabel zumeist in den Seeboden eingespült werden und sich ständig im wassergesättigten Zustand befinden, ist eine Variation des Wassergehaltes bei der Untersuchung nicht von Interesse. Die Untersuchung der thermischen Eigenschaften der Seeböden erfolgt deshalb zumeist in Abhängigkeit der Bodenverdichtung, weil diese durch die Wahl des Einbauverfahrens und der Einbautiefe des Kabels variiert werden kann. Zudem kann der Salzgehalt des den Porenraum des Bodens sättigenden Fluids in die Untersuchung eingehen, da er einen direkten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Fluids besitzt. In der Regel sind die Salzgehalte von Meerwasser allerdings zu gering, um sich signifikant auf die Wärmeleitfähigkeit des Fluids auszuwirken. In Ozbek & Philipps (1980) ist eine empirisch ermittelte Gleichung (4.1) für die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund des Salzgehaltes gegeben.

$$\frac{\lambda}{\lambda_w} = 1 - (2,3434 \cdot 10^{-3} - 7,924 \cdot 10^{-6} T + 3,924 \cdot 10^{-8} T^2) S_{sa} + (1,06 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-8} T + 1,2 \cdot 10^{-10} T^2) S_{sa}^2 \quad (4.1)$$

Mit:

S_{sa} Salzgehalt in %

In Abbildung 4.1 sind die nach Gleichung (4.1) berechneten Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur und des Salzgehaltes dargestellt.

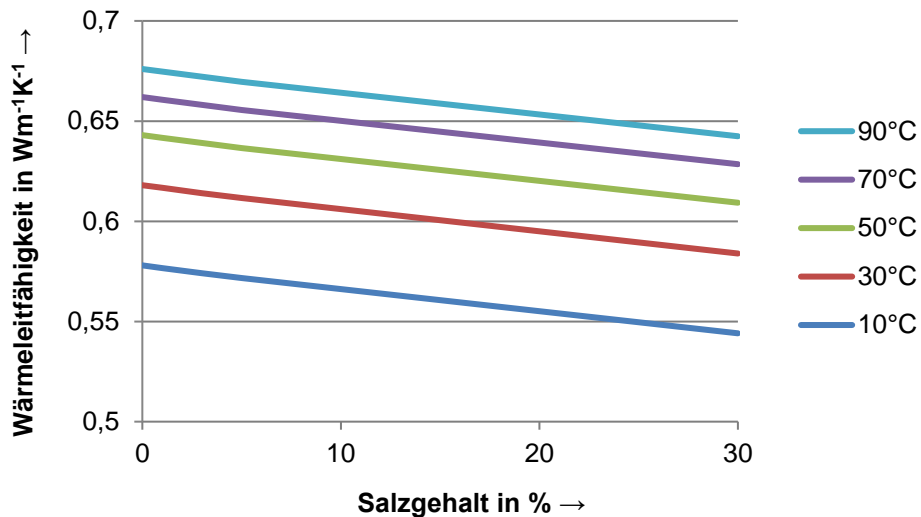


Abbildung 4.1: Berechnete Wärmeleitfähigkeit von Wasser in Abhängigkeit von Salzgehalt und Temperatur

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser sinkt im Bereich von 0 bis 5 % Salzgehalt um ca. 1 % und im Bereich von 0 bis 30 % um ca. 5 %. Deswegen muss die Wassersättigung für die Messung von gestörten Proben nur bei hohen Salzgehalten mit salinen Lösungen durchgeführt werden. Bei Proben z. B. aus der Nord- oder Ostsee mit Salzgehalten im Fluid von unter 5% können Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit der Probe aufgrund des Salzgehaltes des Meerwassers vernachlässigt werden.

4.1.2 Onshore-Energiekabel

Kabel der Transportnetzebene sind zumeist in Tiefen von 1,20 bis 1,60 m verlegt. Tageschwankungen der Oberflächentemperaturen sind in dieser Tiefe ebenso wie kurzzeitige hydraulische Veränderungen aufgrund von Niederschlagsereignissen kaum erkennbar. Energiekabel in dieser Spannungsebene sind zum Teil auch in thermisch verbesserte Bettungen auf Zement- oder Bentonitbasis eingebaut, die gute Wärmeableitung im Nahbereich der Kabel gewährleisten. Der Temperaturgradient zwischen dem Temperaturniveau von bis zu 70 °C am Kabelmantel zu der Umgebung liegt dann zum Teil im Bettungsbaustoff, der auch im ausgetrockneten Zustand noch Wärmeleitfähigkeiten von $3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ aufweisen kann (Brakelmann et al., 2011). Hierdurch wird die Erwärmung des umgebenden Bodens verringert und eine Bodenaustrocknung vermieden.

Die Kabel der Verteilnetzebene liegen zumeist in einer Tiefe von 60 bis 80 cm, in der kurzfristige hydraulische Veränderungen aufgrund von Niederschlagsereignissen auftreten, Temperaturgänge der Oberflächentemperaturen sind stark gedämpft. Die Eindringtiefe der täglichen Temperaturänderungen bleibt nach Bachmann (1997) in Böden auf maximal ca.

50 cm beschränkt. Der Tagesgang der Temperaturen hat damit keine direkte Auswirkung auf die Kabelumgebung. Messwerte der Temperaturzeitreihen aus dem Erdkabeltestfeld (Abschnitt 7), die dies bestätigen, sind in Abbildung 7.12 dargestellt.

Die geothermische Untersuchung der Bettungen der genannten Erdkabel sollte zu vorgegebenen Verdichtungen durchgeführt werden, weil die Verdichtung eine beim Einbau einstellbare Variable darstellt. Ebenso sollte die Saugspannung und die Temperatur berücksichtigt werden. Der Wetter- und Regeneinfluss auf die Kabeltemperaturen hängen stark von der Einbautiefe und den hydraulischen Eigenschaften des Bodens ab, und diese Einflüsse sind deswegen bei Kabeln des Verteilnetzes in der Regel mehr zu beachten als bei Kabeln des Transportnetzes.

4.1.3 Sonderbauformen

Unterquerungen von Hindernissen wie z. B. Straßen oder Flüssen können oft nicht im offenen Verbau durchgeführt werden. Die Kabel werden dann im gesteuerten Horizontalbohrverfahren (HDD), das teilweise verrohrt ausgeführt wird, verlegt. Die Rohre, in die die Kabel eingezogen werden, können dabei luftgefüllt belassen oder mit einem thermisch verbesserten Baustoff verfüllt werden (Brakelmann et al., 2011). Für die Bestimmung der Wärmeübergänge und Widerstände muss das in Abhängigkeit der gewählten Ausführungsvariante variierende Gesamtsystem Kabel-Rohrverfüllung-Rohr-Boden und dessen temperaturabhängige Veränderung untersucht werden. Wetter- und Klimaeinflüsse sind in der Regel aufgrund der Bohrtiefe vernachlässigbar. Ein Grundwasserfluss kann die effektive Wärmeleitfähigkeit der Kabelumgebung stark beeinflussen (Huber, 2013). Nach den Informationen und Empfehlungen für Planung, Bau und Dokumentation von HDD-Projekten (DCA, 2015) ist bereits in der Planungsphase eine Baugrunderkundung mit Aufschlussbohrungen von 2 bis 5 m Tiefe unterhalb der geplanten Tiefenlage der Leitungsachse durchzuführen. Weiterhin ist u. a. die Permeabilität der Schichten zu bestimmen und ein Baugrundgutachten zu erstellen. Die Daten aus dem Baugrundgutachten ermöglichen eine Bewertung des Grundwassereinflusses, und die Proben aus den Aufschlussbohrungen können für die thermische Untersuchung verwendet werden.

In Pokojski & Westermann (2011) wurde die alternative Nutzung bestehender Infrastruktur für die Übertragung elektrischer Energie untersucht. Dabei wurde u. a. die Kombination von Infrastrukturen von Eisenbahn, Autobahnen, Pipelines, Flüssen und Kanälen mit Kabeln untersucht und als nutzbar mit spezifischen Vorteilen der verschiedenen Systeme eingestuft. Auch für Kabel in Eisenbahn- oder Autobahnunterbauten sowie Flussbetten und Kanälen gilt der Ansatz der Wärmeableitung über den umgebenden Feststoff/Baustoff und dessen Porenfüllung.

4.2 Probenentnahme und -behandlung

4.2.1 Einordnung von Proben

Die Klassifizierung der 39 Hauptbodenarten entsprechend der Bodenkundlichen Karte von Bayern im Maßstab 1:500.000 erfolgte hinsichtlich thermischer und geotechnischer Kennwerte. Normierte Regelungen für die Untersuchung von thermischen Kennwerten an Bodenproben existieren bisher nicht. Deswegen wurde ein Programm für die Entnahme, den Transport und die Lagerung der Proben entwickelt. Es wird dabei auf die Einhaltung der Regelungen der Normenfamilie der DIN ISO 10381 geachtet.

Hierbei sind vor allem

- Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probenahmeprogrammen,
- Teil 2: Anleitung für Probenahmeverfahren,
- Teil 3: Anleitung zur Sicherheit,
- Teil 4: Anleitung für das Vorgehen bei der Untersuchung von natürlichen, naturnahen und Kulturstandorten zu beachten.

Nach Definition der DIN ISO 10381-1 werden Bodenproben in erster Linie entnommen und untersucht, um die

- Art, Konzentration und Verteilung natürlich auftretender Substanzen;
- Art, Konzentration und Verteilung von Kontaminanten (Fremdsubstanzen);
- physikalischen Eigenschaften und deren Änderungen und die
- Anwesenheit und Verteilung zu berücksichtigender biologischer Spezies festzustellen.

Die (geo-)thermische Untersuchung von Bodenproben kann hier in den Bereich der Bestimmung physikalischer Eigenschaften eingeordnet werden.

Die Einordnung von Bodenproben erfolgt in zwei Grundarten. Diese sind gestörte und ungestörte Proben.

4.2.1.1 Gestörte Proben

Als gestörte Proben werden nach DIN ISO 10381-2 Bodenproben bezeichnet, die ohne jeglichen Versuch, das Bodengefüge zu schützen, entnommen werden. Das bedeutet, die Bodenteilchen werden lose gesammelt und haben die Möglichkeit, sich gegeneinander zu bewegen.

Zu Ihnen gehören als Proben, für die Homogenität vermutet wird, die

- Schlitzprobe als vertikaler Schlitz, die aus einer Schicht oder einer anderen Einheit entnommen wird, und die
- Schichtprobe, die als Kombination von Einzelproben aus Schichten oder untergeordneten Einheiten erhalten wurde.

Inhomogenität wird für die

- Sammelprobe, die sich aus nahe beieinander entnommenen kleinen Einstichen zusammensetzt, und die
- Flächenprobe, die sich aus über einen Bereich (zum Beispiel ein Feld) entnommenen kleinen Punktpuben zusammensetzt, vermutet.

4.2.1.2 Ungestörte Proben

Ungestörte Bodenproben sind Bodenproben, die nach einem zum Schutz des Bodengefüges entwickelten Verfahren entnommen werden. D. h., es wird ein spezielles Probennahmegerät (im Falle der hier durchgeführten Untersuchungen Ausstechzylinder) verwendet, so dass die Bodenteilchen und Hohlräume ihre vor der Probennahme im Boden vorhandene Verteilung nicht verändern können.

Als ungestörte, aber auch als gestörte Probe kann nur die Punktprobe, bzw. Einzelprobe, die aus Material, das an einem einzelnen Punkt entnommen wurde, besteht, eingeordnet werden.

4.2.2 Vorgehensweise im Feld

Für die ersten Probennahmen wurde jeweils ein Schurf (Abbildung 4.2) mit den Abmessungen $L/B/H = 50/60/70$ cm mit Schaufel und Spaten angelegt. Bei Böden mit höheren Aushubklassen wurde auch ein Pickel eingesetzt. Am Grund und an den Wänden des Schurfs konnte die bodenkundliche Begutachtung der Horizonte, die Beprobung, die direkte Messung von in-situ Kennwerten und die ungestörte Entnahme von Punktpuben mittels Stechzylindern und die gestörte Entnahme von Schlitzproben durchgeführt werden.

Da die rein händische Vorgehensweise zeitaufwändig und arbeitsintensiv ist, wurde das Entnahmekonzept sukzessive optimiert. Es wurden dabei die Vorteile eines klassischen Schurfes, nämlich die Möglichkeit der optischen und der olfaktorischen Beurteilung der einzelnen Bodenhorizonte, sowie die Möglichkeit der Entnahme von ungestörten Bodenproben über Stechzylinder ebenso wie die Entnahme von gestörten Bodenproben als Mischproben über verschiedene Schichten beibehalten. Die Mobilität der Werkzeuge für die Anlegung des Beprobungspunktes und damit die Flexibilität in der Ortsauswahl wurde ebenfalls beibehalten. Die hierin entwickelte Methodik der Bodenprobennahme bezieht

sich explizit auf die Untersuchung der Bodeneigenschaften für den Einbau von Mittel- und Niederspannungskabeln.



Abbildung 4.2: Händisch angelegter Schurf (Thoma, 2014)

Es wird davon ausgegangen, dass bei der Voruntersuchung im Rahmen der Trassenplanung für diese Netzebene in der Regel keine umfassende Erkundung der Bettungsböden betrieben wird. Im Falle von Offshore- und Onshore-Hochspannungstrassen wird in der Regel eine geotechnische Erkundung durchgeführt, aus der Bodenproben für die thermische Untersuchung verwendet werden können. Hier ist eine individuelle Anpassung des Entnahmeverfahrens an die geotechnische Erkundung sinnvoll, bzw. die Beprobung kann an Bohrkernen, die aus der Erkundung vorliegen, erfolgen.

4.2.2.1 Flächenauswahl

Zuerst wird eine repräsentative Arbeitsfläche von ca. 25 m² für den zu untersuchenden Boden gesucht. Hierbei sollten sowohl landwirtschaftlich bearbeitete Flächen, als auch Flächen, die direkt an Flüsse bzw. Baumwurzeln angrenzen, vermieden werden. Als gut geeignet zur Gewinnung von möglichst ungestörten Proben und Messwerten haben sich Bereiche zwischen Wäldern und landwirtschaftlichen Flächen sowie Wiesen herausgestellt, da sie nicht von tiefgreifender Durchwurzelung oder landwirtschaftlicher Bearbeitung gestört sind.

4.2.2.2 Instrumentierungsbohrung

Auf dem ausgewählten Beprobungsareal wird eine quadratische Fläche mit 80 cm Kantenlänge für die Instrumentierungsbohrung IB (Abbildung 4.3) und die Installation von Messeinheiten freigeräumt. Direkt dahinter wird eine Plane mit einer Fläche von ca. 1 m² ausgebreitet. Auf dieser Plane wird der bei der Bohrung anfallende Erdaushub verteilt und kann so begutachtet werden.

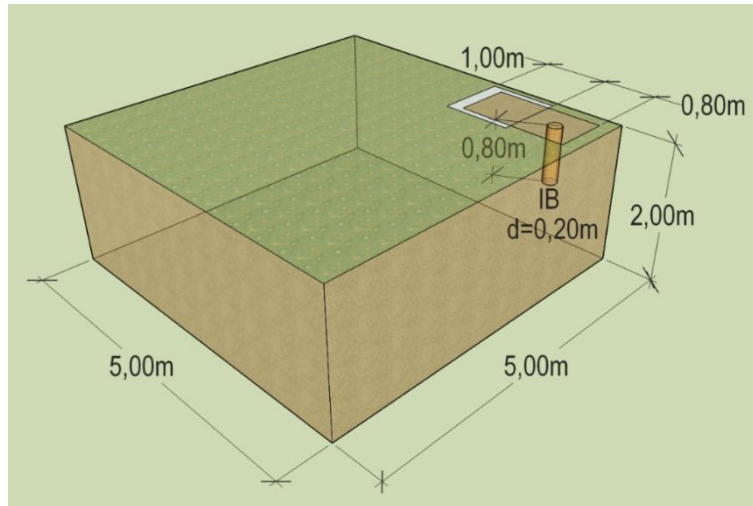


Abbildung 4.3: Beprobungsareal mit vollständig abgeteufter Instrumentierungsbohrung (IB)

Die Auflockerung des Bodens und ein Teil des Aushubes werden mit einem Erdbohrgerät mit Benzinmotor und 20 cm Bohrdurchmesser durchgeführt. Hierbei hat sich ein handelsübliches Spiralbohrgerät, das von einer Person alleine betrieben wird, als gut geeignet für Probennahmetiefen bis 80 cm herausgestellt. Solche Geräte sind aufgrund des relativ geringen Gewichtes sehr gut zu transportieren.

Wenn die Bohrung auf die Zieltiefe abgeteuft ist, wird der restliche Aushub entfernt. In die Bohrung können für die Feldmessung Sensoren, wie Frequency-Domain-Reflectometry-Sensoren zur Bestimmung des in-situ Wassergehaltes und Nadelsonden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eingebracht werden. Die Bohrung wird anschließend mit einer Platte gegen Einwirkungen durch Sonneneinstrahlung etc. abgedeckt.

4.2.2.3 Zugangs- und Beprobungsbohrung

Anschließend wird in einem Abstand größer 4 m zur Instrumentierungsbohrung IB eine Zugangsbohrung ZB für die Probenentnahme angelegt (Abbildung 4.4). Hierfür werden zuvor wie beim Anlegen von IB die Fläche freigeräumt und eine Plane ausgelegt. Der bei der Bohrung anfallende Aushub kann auf der Plane direkt mit dem Aushub aus IB verglichen werden. Der Abstand von 4 m soll aufgrund der Sensitivität der Nadelsondenmessung in IB eingehalten werden. Nachdem die Zugangsbohrung vollständig abgeteuft ist, wird sie mit einer Platte abgedeckt und direkt angrenzend eine Beprobungsbohrung BB angelegt. BB wird schrittweise abgeteuft, so dass jeweils am Grund der Bohrung ein Ausstechzylinder für die Entnahme ungestörter Proben eingeschlagen werden kann. Die Ausstechzylinder werden jeweils seitlich von ZB ausgegraben.

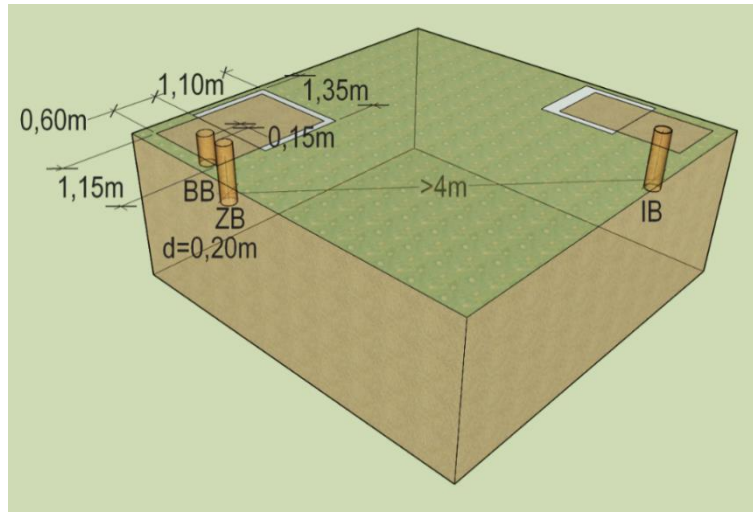


Abbildung 4.4: Beprobungsareal mit vollständig abgeteufter Zugangsbohrung (ZB) und teilweise abgeteufter Beprobungsbohrung (BB)

4.2.2.4 Schurf und Rammsondierung

Nachdem BB bis zur Endteufe eingebracht ist und die Ausstechzylinder entnommen sind, werden aus den Bohrlochwänden Mischproben mittels einer Spachtel entnommen. Die spätere verdichtungsabhängige Untersuchung der Mischprobe ermöglicht eine Beurteilung der Eigenschaften des Bodens nach dem Wiedereinbau in den Kabelgraben. Durch den Ausbruch bei der Bohrung und die Mischprobenentnahme bildet sich ein Schurf BS (Abbildung 4.5) mit Abmessungen von bis zu L/B/H=65/40/80 cm aus. Die Länge und Breite des Schurfes fallen mit zunehmend bindigen Bodeneigenschaften geringer aus.

Im Abstand von mindestens 4 m zu IB können dann Rammsondierungen mit der leichten Rammsonde nach DIN 4094-3 zur Aufnahme der Lagerungsdichte und Homogenität des Bodens auf 2 m Tiefe eingebracht werden. Wenn Rammsondierungen durchgeführt werden, werden jeweils zwei zur Validierung der Messung durchgeführt. Ergebnisse von Rammsondierungen sind in Anhang 2 dargestellt.

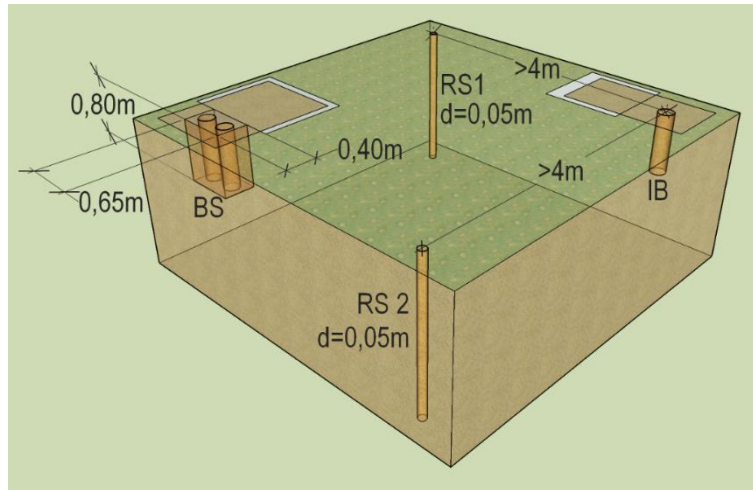


Abbildung 4.5: Beprobungsareal mit vollständig abgeteufte Bohrungen und angelegtem Schurf, nach der Durchführung von Rammsondierungen.

4.2.2.5 Lagerung und Transport der Proben

Aussteichzylinder müssen direkt mit Folie oder Kunststoffdeckeln luftdicht verschlossen werden, so dass kein Wasser entweichen kann. Mischproben werden im Eimer mit luftdichten Deckeln gelagert. Nach dem Transport werden die Bodenproben kühl (2 bis 4 °C) und dunkel aufbewahrt, um eine Vermehrung von Mikroorganismen zu bremsen. Gefrierverfahren werden nicht angewendet, um die Bodenstruktur bzw. Lagerungsdichte nicht zu verändern. Der Transport der Ausstechzylinder soll möglichst erschütterungsfrei durchgeführt werden und kann sowohl stehend als auch liegend erfolgen. Im Verlauf der Untersuchungen wurden bei erschütterungsarmem Transport keine Setzungen der Proben im Ausstechzylinder in unterschiedlichen Transportpositionen festgestellt.

5 ENTWICKELTE MESSVERFAHREN FÜR DIE WÄRMELEITFÄHIGKEIT MIT NADELSONDEN

In Europa ist zurzeit im Gegensatz zu den USA die Messung der thermischen Eigenschaften von Böden nicht normativ geregelt, wohingegen die Untersuchung von Baustoffen und Schüttgütern diesbezüglich u. a. im Zuge der Qualitätssicherung in der Produktion klar geregelt ist. Deswegen erfolgte die Verfahrensentwicklung in Anlehnung an die Norm EN 12664:2001 zur Untersuchung von Baustoffen und unter Einhaltung der Norm ASTM D5334 (2008) zur Untersuchung von Bodenproben mittels Nadelsonden.

Es werden eine Versuchsdurchführung zur Messung wassergesättigter Proben sowie zwei Versuchsdurchführungen zur Ermittlung der Kapillarspannung, der Sättigung sowie der teilgesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, die für die Untersuchung der thermischen Bodeneigenschaften zusätzlich mit Nadelsonden ausgestattet wurden, beschrieben. Die Untersuchungsmethode für die Saugspannungs/-Sättigungsbeziehung muss auf das zu untersuchende Lockergestein und dessen Matrix, die sich u. a. aus der Korngrößenverteilung, der Kornform und der Verdichtung ergibt, und auf die inverse Matrix, den Porenraum abgestimmt werden. Im Säulenversuch (Abschnitt 5.2) werden Kennwerte für Sande (Kapillarspannung 0 bis 90 hPa) unter Ad- und Desorptionsbedingungen bestimmt. Der Verdunstungsversuch kann für alle Bodenarten für die Bestimmung der teilgesättigten hydraulischen Eigenschaften unter Desorptionsbedingungen angewendet werden.

5.1 Messverfahren für wassergesättigte Proben

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Linienquellenprinzip nach Blackwell (1954) kann mit Vollraumsonden sowie mit Halbraumsonden durchgeführt werden (Abschnitt 3.2.1). Für die Messung von feinkörnigen, homogenen Böden und Baustoffen wurde ein Messaufbau für den Einsatz von Halbraumsonden konstruiert (Abbildung 5.1 und 5.2). Er besteht aus einem Zylinder, der als Fuß dient und auf den eine Halbraumsonde aufgelegt ist. Die Halbraumsonde schließt nach oben bündig und wasserdicht mit dem eigentlichen Behälter, in den die Probe eingebracht wird, ab. Damit stellt die Halbraumsonde den Boden des Probenbehälters dar. Die Wandungen aller Teile sind ebenso wie die Halbraumsonde (Standardsonde des Messgerätes TK 04) aus Plexiglas gefertigt. Der Behälter wird mit drei Schrauben an die Halbraumsonde angepresst. Der Probenbehälter selbst ist zweigeteilt. Analog zum Proctortopf nach DIN 18127 können Boden-Wasser-Mischungen gleichmäßig bis oberhalb des Übergangs der beiden Behälterteile eingefüllt werden. Nach Abnahme

des oberen Teils wird die Oberfläche der Bodenprobe in Höhe des Abschlusses des unteren Behälterteils eben abgeschnitten. Auf diese Weise ist immer ein klar definiertes Probenvolumen im Behälter vorhanden. Der ganze Aufbau wird nach Einfüllen des Bodens gewogen. Nach der Wägung kann eine Probe zur gravimetrischen Bestimmung des Wassergehaltes entnommen werden. Aus dem Volumen, der Masse, dem Wassergehalt sowie der zusätzlich bestimmten Korndichte können dann die Bodenkennwerte entsprechend Abschnitt 2.5 berechnet und den Wärmeleitfähigkeitsmessungen zugeordnet werden.

Für die Untersuchung von Proben, bei denen diese Vorgehensweise einen hohen Reinigungsaufwand der äußeren Messbehälterwand nach dem Abschneiden und Abstreifen bedeutet (sehr flüssige Proben oder Öl-Feststoffgemische), oder Proben, bei denen nachträglich der Feststoffanteil nicht über eine Ofentrocknung bestimmt werden kann (Öl-Feststoffgemische), kann die Volumenmessung der Probe auch über die Höhe eines aufgebrauchten Stempels, der mit einem Filterpapier belegt ist, erfolgen. Das Vorgehen ist im Folgenden beschrieben:

Um die Struktur eventuell vorhandener Feinstbestandteile zu erhalten, wird die Probe vor dem Einfüllen bei 65 °C getrocknet. Zur Einstellung der gewünschten Lagerungsdichte wird die Probe in den Messbehälter gegeben und die benötigte Wassermenge berechnet und in die Probe gegeben (Abschnitt 2.5). Um Luftbläschen zu entfernen, wird die Probe einige Minuten lang gerührt (mit dem Rührgerät auf niedrigster Stufe). Damit das Wasser vollständig aufgenommen werden kann, muss die Probe vor der Messung zumeist mehrfach aufgerührt werden. Ist zu viel Wasser zu der Probe gemischt, ist die Wassersäule so groß, dass sich die Probe entmischt.

Der Stempel mit aufgelegtem Filterpapier wird bis auf die Probenoberfläche im Behälter abgesenkt. Da sich die Probe während der Messung leicht komprimiert, sollte das Volumen zu Beginn der Messung und nach der Hälfte der Einzelmessungen bestimmt werden. Hierzu wird an drei Stellen der Abstand Probenoberfläche zur Messbehälteroberkante mittels einer Schiebelehre gemessen. Das Volumen errechnet sich aus dem Durchmesser des Probenbehälters und der Höhe des Stempels. Bei besonders lockerer Lagerungsdichte kann nach jeder zweiten Einzelmessung die Probe aufgerührt werden, um eine Setzung zu vermeiden.

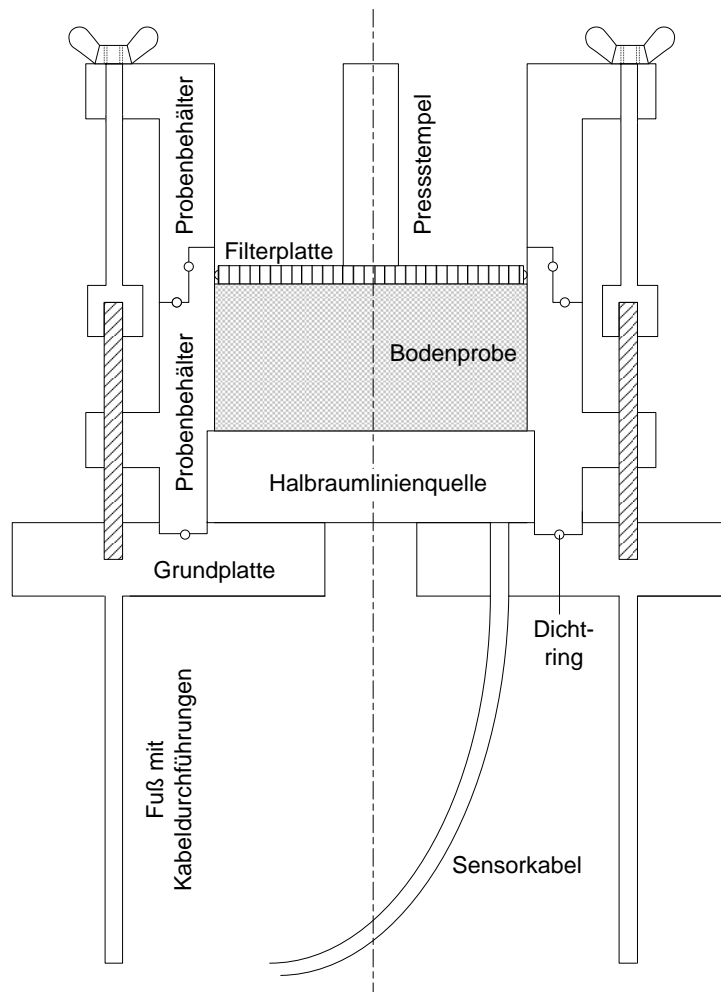


Abbildung 5.1: Schnitt durch den Messaufbau



Abbildung 5.2: Messbehälter mit einer Halbraumsonde im Boden (links), Messbehälteraufsatz (rechts oben), Filterstempel (rechts unten)

Nach der Messung wird die Probe aus dem Messbehälter vollständig ausgespült und in einem vorgewogenen Behälter gesammelt. Nach dem Absetzen des Feststoffanteils wird die darüberstehende Wassersäule abgegossen und die Probe im Ofen bei 105 °C getrocknet und gewogen.

Bei der Verwendung eines Stempels ist auch eine geplante leichte Kompaktierung der Probe für eine zweite Messung möglich. Beispiele für solche Messungen an Seeböden sind in Abschnitt 6 dargestellt. Die Homogenität der Probenverdichtung wurde bei Anwendung dieser Methode mit Hilfe von Ausstechzylindern durchgeführt. Dabei wurden jeweils vier Zylinder ausgestochen und anschließend im Ofen getrocknet und die Trockenroh-dichte bestimmt. Es ergaben sich maximale Abweichungen von 4 %.

Im Gegensatz zu der nach Herstellerangaben empfohlenen Messmethode, bei der die Sonde auf die Probe im Behälter aufgelegt wird, entweicht die Flüssigkeit bei der hier beschriebenen Methode nicht an seitlichen Kerben in der Halbraumsonde, sondern durch einen Filter im aufgesetzten Stempel, wodurch kaum Feststoff beim Anpressen entweicht. Bei Wasser als flüssiger Phase kann der entwichene Feststoff durch Trocknung der Mischung im Behälter nach der Messung und Gewichtsbestimmung derselben ermittelt werden. Bei Feststoff-Öl-Gemischen, wie sie für die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit von hydraulisch abbindenden Rohstoffen für künstliche Bettungsmaterialien verwendet werden, ist dieses Vorgehen jedoch nicht möglich. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bestandteile von Zwei-Phasen-Gemischen erfolgt nach dem in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Modell des geometrischen Mittels. Hierbei wird aus dem Messwert der Mischungswärmeleitfähigkeit λ_{Geo} bei bekanntem Anteil θ des Porenraums und bekannter Wärmeleitfähigkeit λ_{Po} der Porenfüllung (Wasser $\sim 0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, Öl $\sim 0,18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) die Wärmeleitfähigkeit λ_{Ma} der Matrixbestandteile berechnet. Eine Validierung der Berechnungsmodelle ist in Abschnitt 6 dargestellt.

5.2 Säulenversuch

In einem Säulenversuchsstand mit einer Höhe von einem Meter und einem Innendurchmesser von 22 cm (Abbildung 5.3) wird auf ein Sandbett von 90 cm Höhe die Bodenprobe samt Messtechnik eingebracht und vollständig mit Wasser gesättigt. Alternativ kann die Säule auch vollständig mit dem Versuchsboden oder mit Schichtungen von Böden befüllt und in variablen Höhen messtechnisch ausgestattet werden. Durch schrittweises Ablassen des Wassers bis zu einer Tiefe von 89 cm unterhalb der obersten Messebene werden nach dem Erreichen des jeweiligen hydraulischen Gleichgewichtszustandes in jedem Schritt die Kapillarspannung und der zugehörige volumetrische Wassergehalt mittels Tensiometern

und Frequency-Domain-Reflectometry (FDR) Sensoren in der Messebene gemessen. Die FDR-Feuchtemesstechnik beruht auf der Messung der elektrischen Kapazität des Bodens. Die elektrische Kapazität hängt von der mengenmäßigen Zusammensetzung des Boden-Wasser-Luft-Kontinuums ab. Die Dielektrizitätszahl von Wasser bei 20 °C ist ca. 80 und die von Bodenbestandteilen und Luft weniger als 8 (Abbildung 5.4). Aufgrund dieser Unterschiede in den Dielektrizitätszahlen ist die gemessene Kapazität ein Maß für den Wassergehalt. Gemessen wird freies und gebundenes Wasser (Scheuermann et al., 2002). Beim FDR-Verfahren gleichen sich Effekte aufgrund von Temperaturänderungen nahezu vollständig aus. Für die Messung ist sehr guter Kontakt zwischen Sonde und Boden notwendig. Besonders sensitiv reagieren die Sensoren auf Hohlräume im direkten Umfeld der Sonde, da die Messintensität nach Cepuder & Hauer (2003) mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt.

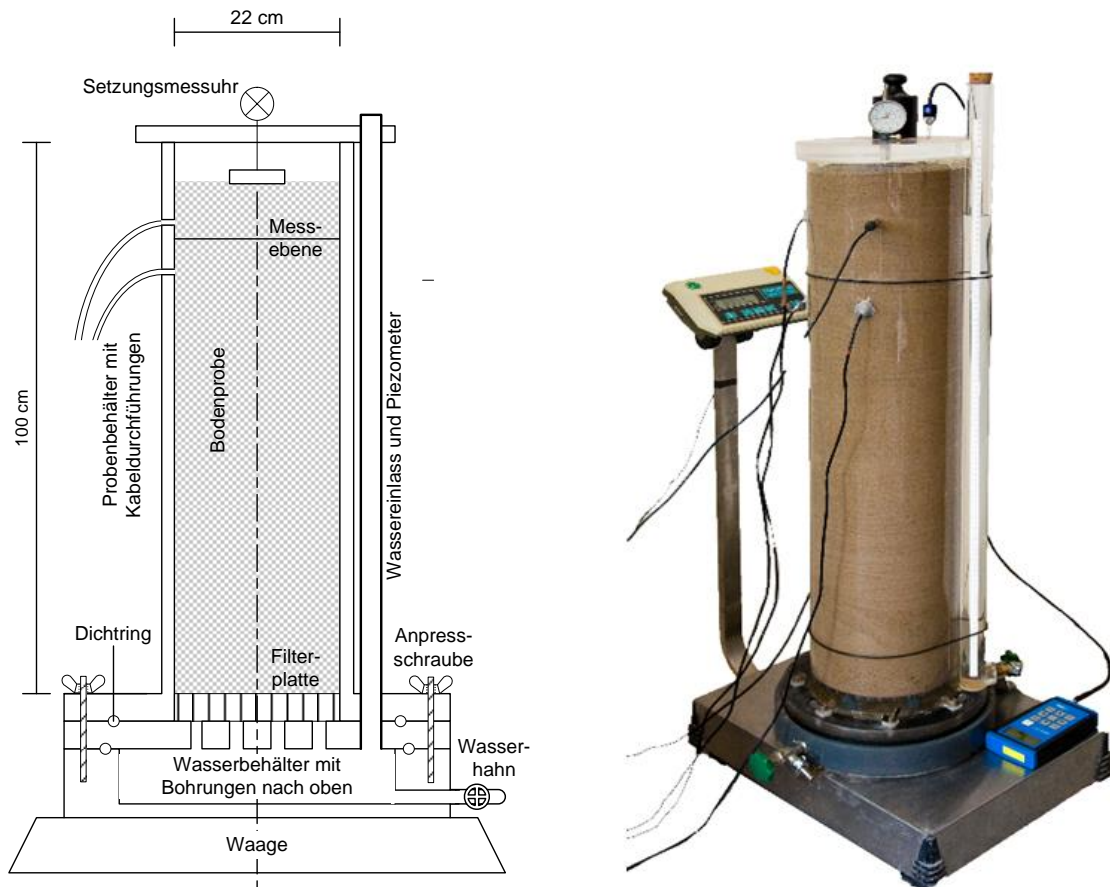


Abbildung 5.3: Säulenversuchsstand zur Bestimmung thermischer und hydraulischer Bodenkennwerte

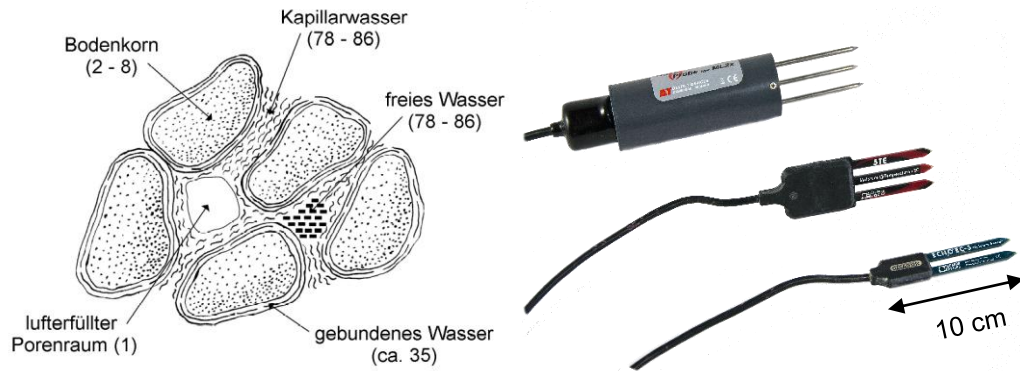


Abbildung 5.4: Dielektrische Eigenschaften von Bodenbestandteilen über deren Dielektrizitätszahlen (Werte in Klammern, links) (Scheuermann et al., 2002), Bauarten von Frequenz-Domain-Reflectometry-Sensoren (rechts)

Die FDR-Sensoren werden für Messungen bodenspezifisch nach Starr & Paltinanu, (2002) kalibriert. Zusätzlich werden die Setzungen des Sandes in der gesamten Röhre mittels einer oben angebrachten Messuhr und das Gesamtgewicht des Versuchstandes gemessen und aufgezeichnet (Stegner, 2009). Die Anordnung der Messgeräte in der Messebene in 90 cm Höhe ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

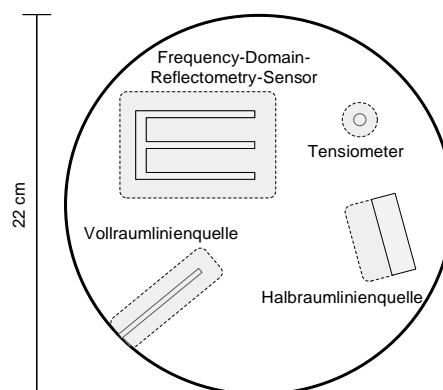


Abbildung 5.5: Anordnung der Sensoren in der Messebene (grau markiert: mittlere Einflussbereiche der Sonden) (Sass & Stegner, 2012)

Der Versuch ermöglicht es, gestörte Bodenproben unter realitätsnahen Bedingungen bei Be- und Entwässerung zu untersuchen. Es ergeben sich aus den Messwerten die Beziehung zwischen der Kapillarspannung und der Sättigung für die Ent- und Bewässerung sowie die zugehörigen Wärmeleitfähigkeiten. Aufgrund der mit abnehmenden Korndurchmessern steigenden Zeit bis zum Erreichen der jeweiligen Gleichgewichtszustände eignet sich dieser Versuch besonders für Böden mit einer Permeabilität im Bereich von Sanden. Vorteil des Säulenversuches ist die Möglichkeit der Detailuntersuchung der Entwässerung

in geringen Saugspannungsbereichen bei Be- und Entwässerung. Nachteile sind der geringe Saugspannungsbereich (Entwässerungshöhe der Säule) und der hohe Zeitaufwand für die Untersuchung von teilweise mehreren Tagen bis zur Einstellung eines hydraulischen Gleichgewichtes pro Druckstufe in der Säule.

5.3 Anpassungsfunktion für die Messwerte

Um die aus diesem Versuch gewonnen Messwerte von Kapillarspannung, Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit als stetige Funktionen darzustellen, müssen sie durch mathematische Ausdrücke beschrieben werden. Verschiedene Anpassungsfunktionen zur Beschreibung der Beziehung zwischen Kapillarspannung und Sättigung sind in Abschnitt 2.6 dargestellt. In Anlehnung an die van Genuchten-Funktion nach Gleichung (5.1) zur Beschreibung dieser Beziehung wurde Gleichung (5.2) zur Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit des Matrixpotenzials Ψ entwickelt (Sass & Stegner, 2012).

Die fünf Parameter der van Genuchten-Funktion sind der Restwassergehalt θ_r nach der Entwässerung, der Sättigungswassergehalt θ_s , der Maßstabsfaktor α zur Definition des Porengrößenmaximums und die Parameter n und m zur Beschreibung der Porengrößenverteilung. Der Parameter m kann nach Ad-Hoc-AG Boden (1999) als $m = 1 - 1/n$ eingesetzt werden.

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\Psi|)^n]^m} \quad (5.1)$$

Hierauf aufbauend sind in Gleichung (5.2) λ_s die gesättigte Wärmeleitfähigkeit, λ_r die Wärmeleitfähigkeit nach der Entwässerung, α^* ein Maßstabsfaktor und n^* ein Parameter für die Porengrößenverteilung.

$$\lambda(\Psi) = \lambda_r + \frac{(\lambda_s - \lambda_r)}{[1 + (\alpha^* |\Psi|)^{n^*}]^{1 - \frac{1}{n^*}}} \quad (5.2)$$

Eine Auswertung ist an einem Mittelsand der Körnung 0/2 mit einer Korndichte von $2,68 \text{ gcm}^{-3}$ und einem Porenraum von 43 % in Abbildung 5.6 dargestellt. Dieser Sandtyp wurde bis in die 1990er Jahre regelmäßig zur Bettung von Erdkabeln in Bayern eingesetzt.

Die Kurvenanpassung für die Kapillarspannung und die Wärmeleitfähigkeit zeigt ebenso wie die Kurvenanpassung für die Kapillarspannung und den Wassergehalt nach van Genuchten gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Zwischen der Form der Kurve der Kapillarspannung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der Form der Kurve der Kapillarspannung in Abhängigkeit des Wassergehaltes bestehen signifikante Übereinstimmungen. Die verwendeten Anpassungsparameter sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Da es

sich bei dem verwendeten Sand um einen Sand für bautechnische Zwecke handelt, bei dem der Feinstkornanteil ausgewaschen wurde, verläuft die Entwässerungskurve in einem kleineren Kapillarspannungsbereich als bei den meisten natürlich anstehenden Sanden. Bei ihnen trägt der Feinstkornanteil zusätzlich zur Wasserbindung bei. Dies spiegelt sich an einem hohen Wert des Anpassungsparameters n zur Beschreibung der Porengrößenverteilung nieder, der in Hartge & Horn (1999) für natürlich anstehende Sande bis 4,5 angegeben wird. Die beschriebene Anpassungsmethode kann dafür eingesetzt werden, die thermischen Bodencharakteristika als stetige Funktion in FEM-Softwares zu berücksichtigen. Für intermittierend gestufte Kurvenverläufe der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Kapillarspannung kann analog zum beschriebenen Vorgehen eine Übertragung der Funktion für die Wasserspannungskurve nach Durner (1994), die die Überlagerung zweier van Genuchten-Funktionen darstellt erfolgen.

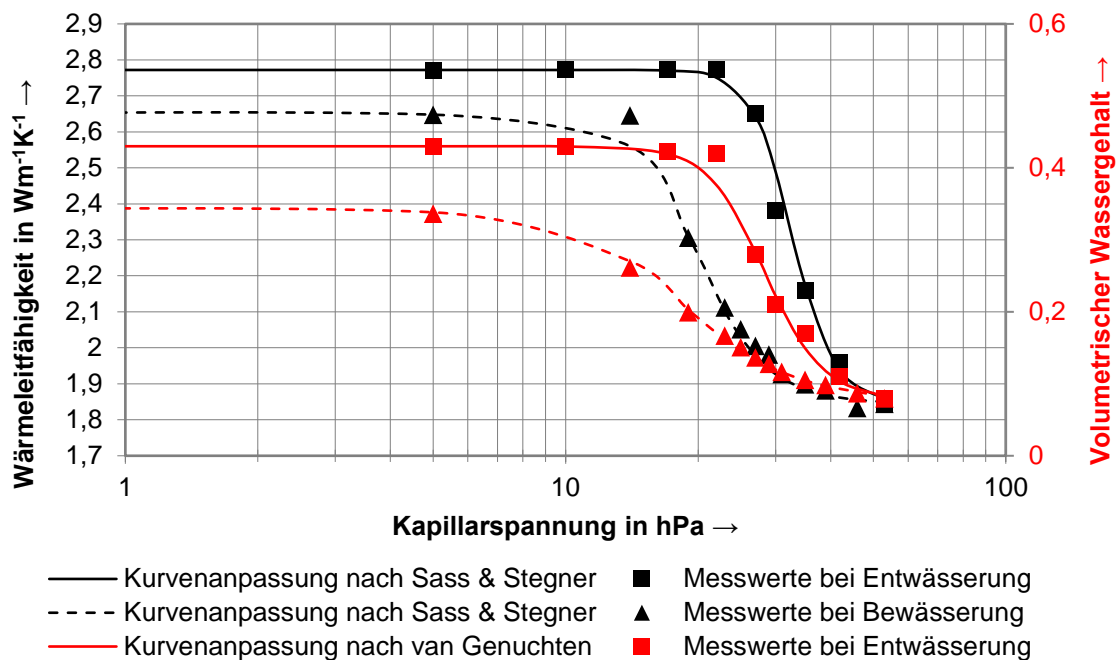


Abbildung 5.6: Messwerte und Kurvenanpassungen eines Mittelsandes Körnung 0/2

Tabelle 5.1: Parameter der Kurvenanpassungsfunktionen

Hydraulischer Vorgang	Hydraulische Parameter nach van Genuchten			
	θ_r	θ_s	α	n
Entwässerung	0,075	0,43	0,036	6,3
Bewässerung	0,075	0,34	0,060	3,9
	Thermische Parameter nach Sass & Stegner			
	λ_r	λ_s	α^*	n^*
Entwässerung	1,85	2,77	0,031	9,5
Bewässerung	1,70	2,65	0,052	6,0

5.4 Verdunstungsversuch

Der Verdunstungsversuch nach Schindler (1980) ist eine Vereinfachung des Ansatzes von Wind (1968). In einer wassergesättigten Stechzylinderprobe werden zwei Tensiometer in unterschiedlicher Tiefe so eingebaut, dass der Mittelpunkt der Strecke zwischen den beiden Tensiometerspitzen dem Mittelpunkt des Stechzylinders entspricht. Das Gerät wird für die Untersuchung mit dem aufgesetzten Stechzylinder auf einer Waage platziert (Abbildung 5.7).



Abbildung 5.7: Verdunstungsversuch nach Schindler (1980), offenes Versuchsgeschoss (links), eingebaute Bodenprobe (rechts)

Die Bodenoberfläche im Zylinder ist gegen die Atmosphäre offen, wodurch das Bodenwasser frei verdunsten kann. Die verdunstete Wassermenge wird über die Waage gravimetrisch bestimmt. Die absolute Wassergehaltsbestimmung über die Messdauer erfolgt am Ende eines Versuchs aus dem Restwassergehalt und dem Gewichtsverlust während der Messung. Hierzu wird der Restwassergehalt durch Trocknung der Probe bei 105 °C gravimetrisch bestimmt.

Das Verdunstungsverfahren basiert auf der Annahme einer linearen Wassergehalts- und Saugspannungsveränderung über die Tiefe und einer linearen Probengewichts- und Kapillarspannungsänderung zwischen zwei Berechnungszeitpunkten. Die Saugspannungs-/Sättigungsbeziehung wird aus den Messwerten der mittleren Saugspannung beider Tensiometer und dem zum gleichen Zeitpunkt gemessenen Wassergehalt gebildet.

Die hydraulische Leitfähigkeit K stellt den Quotienten aus der Geschwindigkeit v des Wassers in der Probe und dem hydraulischen Gradienten i_m dar. Der hydraulische Gradient ergibt sich aus der Druckdifferenz der in den Tensionmetern gemessenen Drücken ψ und deren Abstand Δz . Die Änderung des Wassergehaltes ergibt sich aus der Massenänderung Δm . Die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt nach Gleichung (5.3).

$$K(h) = \frac{v}{i_m} = \frac{\Delta m}{2A \cdot \Delta t \cdot i_m \cdot \rho_w} \quad (5.3)$$

Es gelten die Gleichungen (5.3) bis (5.6).

$$\Delta m = V_{\Delta t} \cdot \rho_w \quad (5.4)$$

$$v = \frac{V_{\Delta t}}{2A \cdot \Delta t} \quad (5.5)$$

$$i_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{\psi_{t1,oben} - \psi_{t1,unten} + \psi_{t2,oben} - \psi_{t2,unten}}{\Delta z} \quad (5.6)$$

Die Anpassung der Wasserretentionsfunktion und der Leitfähigkeitsfunktion an die aufgetragenen Messwerte erfolgt nach den in Abschnitt 2.6 beschriebenen Methoden. Die Dauer einer Untersuchung hängt primär von der Korngrößenverteilung ab. Für die Austrocknung toniger Böden werden etwa 3 bis 4 Tage, für sandige ca. 10 bis 12 Tage benötigt.

Durch den Einsatz spezieller Siedeverzugstensiometer wird der Messbereich auf 8.800 hPa erweitert. Bei Siedeverzugstensiometern wird der Lufteintrittspunkt der Tensiometerkeramik vor der Messung bestimmt. Hierauf kann eine Extrapolation der Messwerte über den Punkt, an dem Kavitation innerhalb des Tensiometers einsetzt, hinaus durchgeführt werden (Abbildung 5.8). Bei Einsetzen von Kavitation innerhalb eines Tensiometers sinkt die gemessene Kapillarspannung schlagartig auf den Wert des Dampfdruckes des Wassers ab und verbleibt zunächst auch bei weiterer Austrocknung des Bodens auf diesem Wert. Erreicht die Kapillarspannung des Bodens den Wert des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik, sinkt der angezeigte Messwert weiter auf 0 hPa ab. Nach Schindler et al. (2010) können die Messwerte vom Punkt des Einsetzens der Kavitation bis hin zum Zeitpunkt des Lufteintrittes in die Tensiometerkeramik extrapoliert werden, wodurch die Erweiterung des Messbereichs möglich ist.

In diesen vorhandenen Versuchsaufbau wurde eine Vollraum-Linienquelle auf einer Ebene zwischen den beiden Tensiometern installiert. Hierdurch wird die Wärmeleitfähigkeit simultan während des Versuchs bestimmt (Abbildung 5.9). Die Messung ist hierbei nur während der Dehydratation und nicht während der Wiederbewässerung möglich. Bei der Dehydratation ist gegenüber der Bewässerung im Regelfall bei gleicher Saugspannung weniger Wasser im Boden. Zusätzlich ist bei Dehydratation im Gegensatz zu Bewässerung mehr Wasser in den Menisken und weniger Wasser als Hydrathülle um das Korn gebunden. Damit liegt der Messwert der Wärmeleitfähigkeit aufgrund des geringeren thermisch leitenden Querschnittes auf der sicheren Seite.

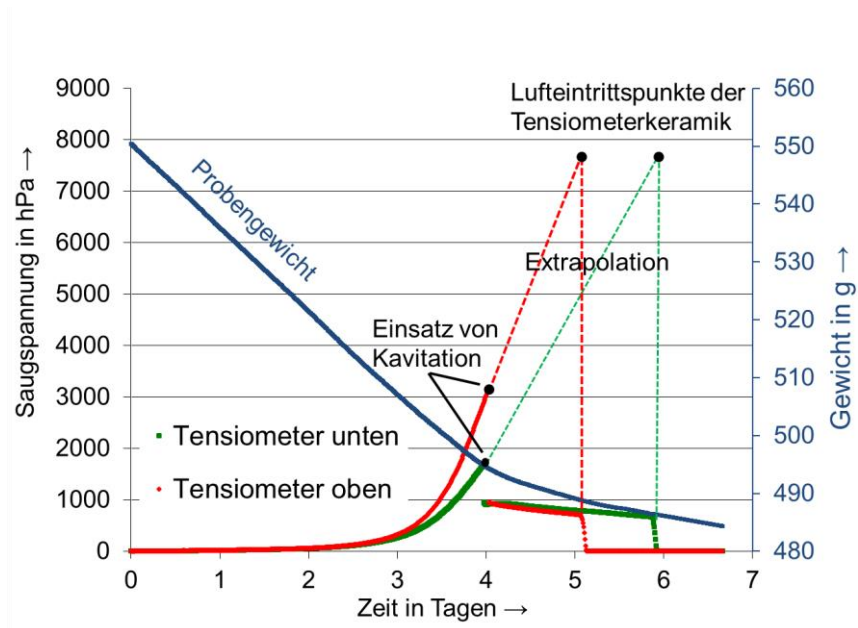


Abbildung 5.8: Saugspannungs- und Probengewichtszeitreihe eines Verdunstungsversuches (Sass & Stegner, 2010 nach Schindler, 1980)

In Trinks (2010) wird ein ähnliches Verfahren beschrieben, bei dem allerdings in zwei getrennten Messtöpfen die Untersuchung der Wassergehalts-/Saugspannungsbeziehung und der Wassergehalts-/Wärmeleitfähigkeitsbeziehung erfolgt. Die Messwerte werden dann über die Wassergehalte miteinander verknüpft. Demgegenüber stellt das hier vorgestellte Verfahren durch die direkte Messung aller Kennwerte an einer Bodenprobe eine Verbesserung der Genauigkeit und eine Verringerung des Messaufwandes dar.

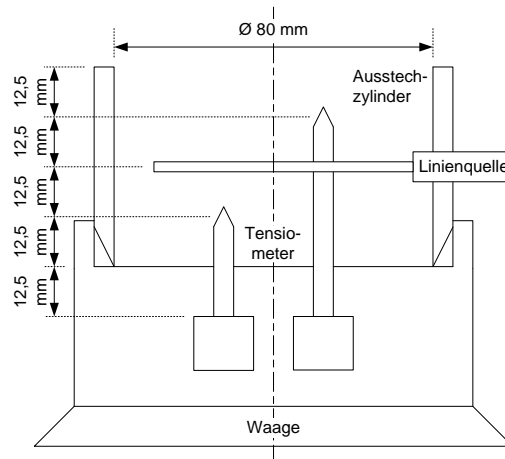


Abbildung 5.9: Ansicht und Schnitt durch das um eine Vollraumlinienquelle erweiterte Verdunstungsversuchsgerät

In Abbildung 5.10 sind beispielhaft die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit und der mittleren Saugspannung der beiden Tensiometer während eines Verdunstungsversuches an einem Granodiorit-Grus dargestellt. Während die Wärmeleitfähigkeit mit dem stetig sinkenden Wassergehalt im Versuch ebenfalls stetig sinkt, bauen sich erst nach ca. 2 Tagen Versuchslaufzeit signifikante Saugspannungen in der Tensiometerebene auf. Bei weiterer Austrocknung wird der Wert der Saugspannung von den Tensiometern nach 4 Tagen nicht mehr erfasst. Der Wassergehalt kann aber durch die Wägung weiter bestimmt werden. Nach ca. 5 Tagen ist der Lufteintrittspunkt in die Tensiometerkeramik erreicht. Im vollständig trockenem Zustand werden üblicherweise Wärmeleitfähigkeiten von ca. $0,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreicht. Die vollständige Trocknung erfolgt im Anschluss an den Verdunstungsversuch durch Ofentrocknung. In Abschnitt 6.3.1 sind eine Reihe von Saugspannungs-/Wärmeleitfähigkeitsbeziehungen von Böden, die auf diese Weise bestimmt wurden, dargestellt.

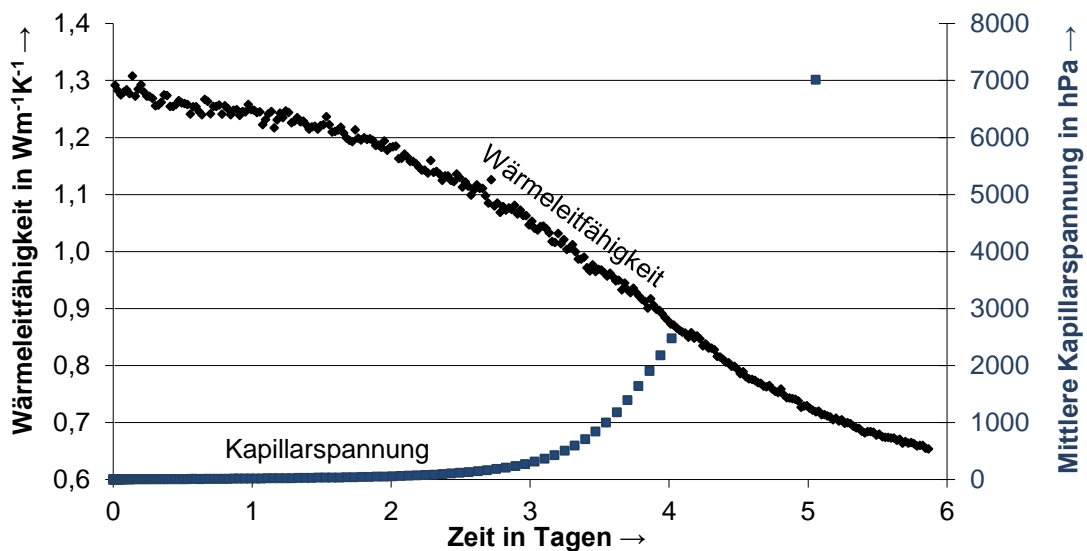


Abbildung 5.10: Wärmeleitfähigkeits- und Kapillarspannungszeitreihe eines Verdunstungsversuches an Granodiorit-Grus

5.5 Messunsicherheiten

Bei den hier vorgestellten Verfahrenskombinationen von Nadelsonden mit anderen Verfahren gehen die Abweichungen aller Einzelmessverfahren in die Gesamtabweichung ein.

Quellen für Messunsicherheiten sind im Einzelnen:

- das Abwiegen der Masse (EG2200, Fa. KERN & SOHN GmbH, $\pm 0,05$ g)
- Höhenbestimmung mittels Schiebelehre zur Volumenbestimmung ($\pm 0,01$ mm)
- Bestimmung des Probenvolumens mittels Heliumpyknometrie (AccuPyc 1330, Fa. Micromeritics Instrument Corporation $\pm 0,05$ cm³)
- Wärmeleitfähigkeitsbestimmung mit Nadelsonden
 - Halbraumlinienquelle (HLQ, Fa. TeKa, ± 2 %)
 - Vollraumlinienquelle (VLQ, Fa. TeKa, ± 2 %)
- Messunsicherheiten der Tensiometer (T5 Fa. UMS GmbH, 5 hPa)
- Messunsicherheiten der Frequency Domain Reflectometry Sensoren (EC-5 Fa. Decagon Devices, Inc., ± 3 % typisch, ± 1 % bis 2 % mit bodenspezifischer Kalibration)

Die Messunsicherheiten der Sensoren werden im Allgemeinen von den bodenspezifischen Einbaumethoden bzw. der optimalen Anbindung der Sensoren an den Boden und der richtigen Auswahl repräsentativer Proben überlagert bzw. dominiert. Deswegen sollte für die Angabe einer Gesamtmessabweichung die statistische Auswertung zahlreicher Messungen mit dem Gerät an verschiedenen Böden erfolgen.

6 UNTERSUCHUNGEN VON BÖDEN UND WERKSTOFFEN

6.1 Untersuchung gesättigter Proben

Es wurden Proben von Seeböden aus der Nordsee (Tabelle 6.1, N1 bis N12) und Ostsee (O1 bis O4) untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurde das in Abschnitt 5.1.1 beschriebene Messverfahren für wassergesättigte Proben angewendet und verifiziert. Die Proben stammen aus Bohrungen mit Entnahme des Bohrgutes in PVC-Rohren (Linern). Die Entnahmegebiete der Proben sind in Abbildung 6.1 dargestellt.

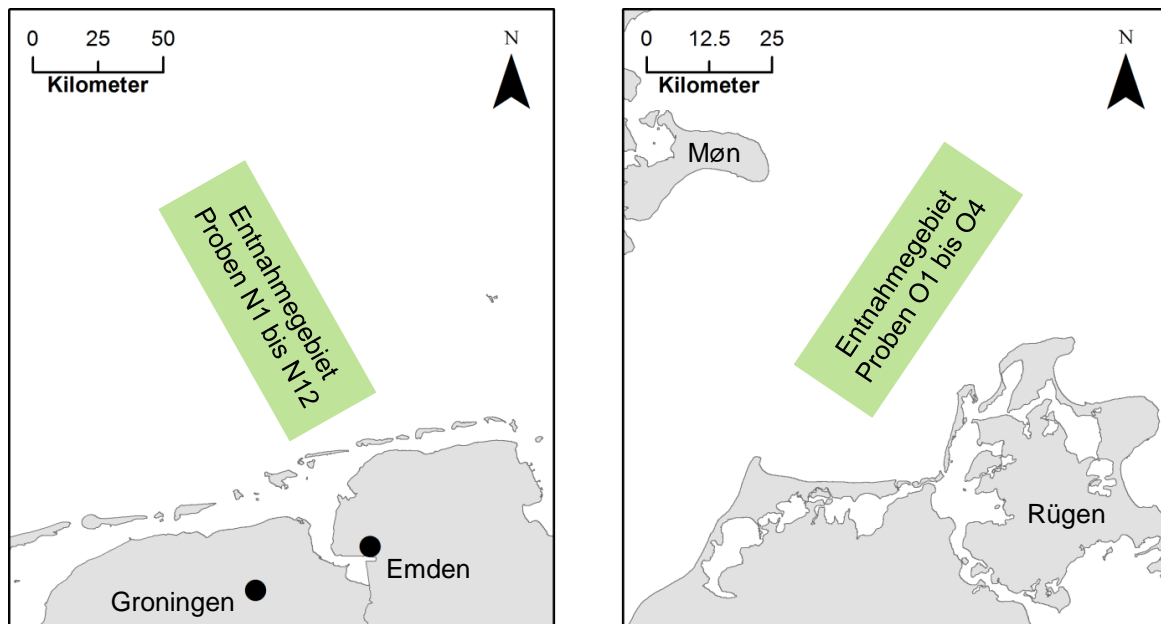


Abbildung 6.1: Entnahmegebiete der Nord- und Ostseeböden

Die Proben wurden jeweils gesiebt und geschlämmt. Auf Basis der so ermittelten Kornsummenlinien wurden die Bodenarten festgelegt. Zudem wurden die mengenmäßigen Anteile organischer Bestandteile, sowie die Korndichten und die Trockenrohdichten in der jeweils vorgefundenen Lagerung nach den in Tabelle 6.1 aufgeführten Normen bestimmt. Aus den Linern wurden jeweils mehrere Stechzylinder entnommen. So wurde die Streubreite der Trockenrohdichten bestimmt. Die Proben wurden vor der Messung schonend (um die Struktur von vorhandenen Tonpartikeln nicht zu zerstören) bei 65 °C getrocknet. Anschließend wurden die getrockneten Proben in Wasser eingerührt. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte im wassergesättigten Zustand. Nach der ersten Messung wurden die Proben verdichtet und die Wärmeleitfähigkeit zusätzlich in diesem Lagerungszustand gemessen. Nur die Proben N5, O3 und O4, die einen sehr hohen Tonanteil enthalten,

wurden im gesättigten Zustand in den Messtopf eingebaut. Die Messungen erfolgten bei 20 °C.

Tabelle 6.1: Bodenkennwerte von Nordsee- (N1 bis N12) und Ostseeböden (O1 bis O4)

Probe	Benennung nach DIN 18196	Entnahmetiefe in m	Organischer Anteil nach DIN 18128 in % _{gew}	Korndichte nach DIN 18124 in gcm ⁻³	Trockenrohdichten zur Messung der Wärmeleitfähigkeit in gcm ⁻³
N1	U, fs	1,4	1,40	2,61	1,62/1,43
N2	U, fs	1,4	1,39	2,65	1,66/1,40
N3	U, fs, ms'	1,1	1,77	2,64	1,67/1,50
N4	U, fs, t''	1,3	2,59	2,61	1,55/1,44
N5	T, U	2,5	9,93	2,55	0,81/0,79
N6	SE	1,5	0,75	2,64	1,53/1,43
N7	ST*	1,3	1,10	2,65	1,42/1,34
N8	ST*	1,6	1,50	2,65	1,44/1,31
N9	ST	0,5	1,55	2,65	1,33/1,18
N10	U	1,4	1,85	2,66	1,39/1,19
N11	ST	1,2	0,55	2,62	1,51/1,23
N12	ST	1,5	1,60	2,66	1,42/1,35
O1	S, u*, t, g'	1-2	-	2,75	1,98
O2	U, t, fs, g', ms', gs'	1-2	-	2,75	1,86
O3	T, u*, fs'	1-2	-	2,73	1,17
O4	T, u*	1-2	-	2,74	1,15

Die organischen Anteile der Proben liegen zwischen 0,55 und 9,93 %_{gew}. Bei Probe N5 kann der hohe Tonanteil die Messung des organischen Anteils verfälscht haben. Die Korndichten liegen zwischen 2,55 und 2,75 gcm⁻³. Die Wärmeleitfähigkeiten der Proben sind in Abbildung 6.2 über die Porenanteile entsprechend den Trockenrohdichten nach Tabelle 6.1 dargestellt. Die Messwerte toniger Böden sind braun, schluffiger Böden grün und sandiger Böden orange eingefärbt. Große Muschelschalen wurden vor der Untersuchung aus den Böden entfernt.

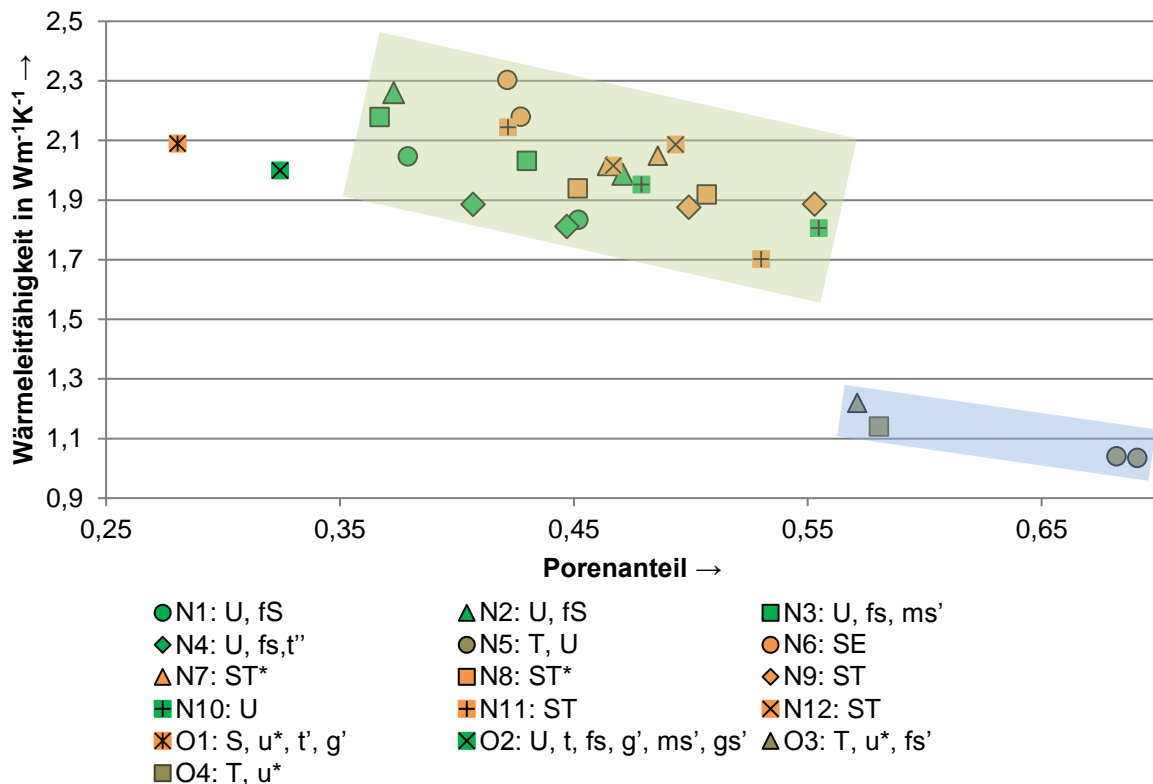


Abbildung 6.2: Gesättigte Wärmeleitfähigkeiten von Nord- (N1 bis N12) und Ostseeböden (O1 bis O4) in Abhängigkeit des Porenanteils

Den Hauptanteil der Böden stellen die grün hinterlegten, schluffigen und sandigen Böden mit eng gestufter Kornsummenlinie dar. Ihre gesättigte Wärmeleitfähigkeit liegt im Durchschnitt bei $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei einem durchschnittlichen Porenanteil von 46 % und variiert bei gleichen Porenvolumina um $0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt mit zunehmenden Porenanteil. Bei einem Teil der Böden steigt der Messwert der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Porenanteil leicht an. Dieses Ergebnis ist auf ein Aufrühren der Proben zwischen den Messungen und einer dabei entstandenen thermisch günstigeren Lagerung zurückzuführen. Das Aufrühren war aufgrund der Messdauer von durchschnittlich 30 Minuten der Serienmessungen bestehend aus 5 Einzelmessungen pro Verdichtungsstufe notwendig. So konnte ein Absetzen von Feststoffen in der Suspension vermieden werden. Physikalisch ist eine abnehmende Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Porenvolumen zu erwarten. Die Messwerte liegen dennoch gegenüber den Herstellerangaben für die Messunsicherheit der verwendeten Nadelsonden in einem Toleranzbereich von 5 %.

Die nicht farbig hinterlegten Messwerte stammen von Böden mit besonders niedrigen Porenvolumina und weitgestuften Kornsummenlinien. Diese Böden weisen eine hohe Verdichtbarkeit auf. Deren Wärmeleitfähigkeit liegt innerhalb des Trends, den der Hauptteil der gemessenen Böden vorgibt.

Die Messwerte der stark tonigen Böden mit großen Porenräumen und besonders niedrigen Wärmeleitfähigkeiten sind blau hinterlegt.

6.2 Rohstoffe für Bettungsbaustoffe

6.2.1 Voruntersuchungen

Für die Bestimmung der Kornwärmeleitfähigkeit pulverförmiger Stoffe wurden diese in einer flüssigen Phase dispergiert. Anschließend wurde die Wärmeleitfähigkeit der Dispersion bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit der festen Phase wurde nach den in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Modellen auf Basis der bekannten Wärmeleitfähigkeit der flüssigen Phase und dem Messwert der Dispersion berechnet. Hierfür wurden die Modelle im Voraus mittels einer Quarzsand-Wasser-Mischung getestet. Der verwendete Quarzsand hat eine Kornwärmeleitfähigkeit von $7,7 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und Wasser eine von $0,60 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei 20°C . Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 6.3 zusammen mit Literaturwerten eingetragen.

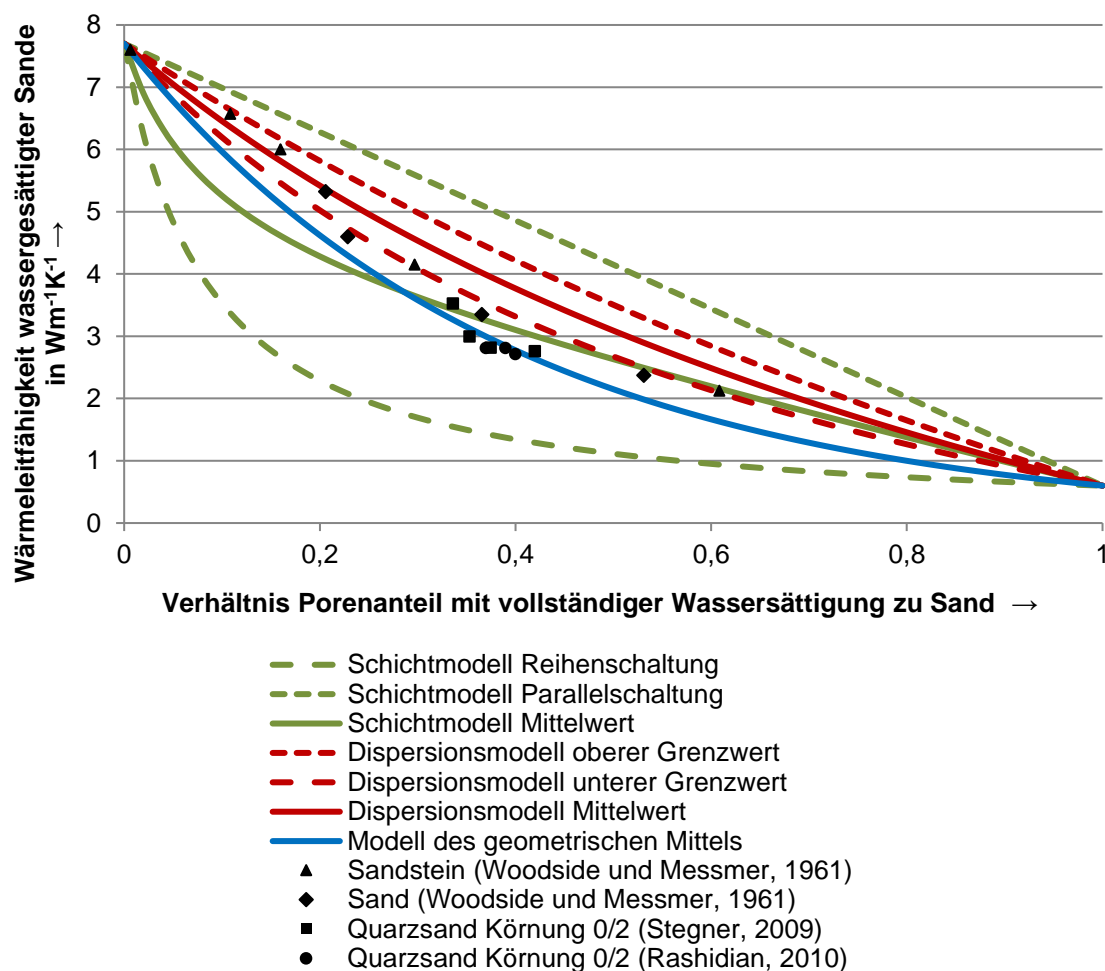


Abbildung 6.3: Modellabhängige Berechnungsergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit eines Quarzsand-Wassergemisches und Messwerte

Es zeigt sich, dass mit allen Modellen eine Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit der Wasser-Sand-Mischung möglich ist. Die besten Übereinstimmungen zwischen Mess- und Rechenwerten im Bereich zwischen 20 und 50% Porenanteil werden unter Verwendung des Modells des geometrischen Mittels und dem Mittelwert des Schichtmodells erreicht. Zusätzlich zu den Sanden wurden Mischungen aus industriellen Rohstoffen (Glas- und Stahlkugeln) untersucht, die die Ergebnisse bestätigen, weswegen das Modell des geometrischen Mittels für die Berechnung der Kornwärmeleitfähigkeiten der Rohstoffe im Weiteren ausgewählt wird.

Die Mischung nicht hydraulisch abbindender Rohstoffe erfolgt wie beim Sand mit Wasser. Für die Messung hydraulisch abbindender Rohstoffe wird Öl als flüssige Phase verwendet. Das für die Messung verwendete Sonnenblumenöl weist in 13 Einzelmesswerten mit einer Varianz der Messwerte von $\pm 2,2 \%$ eine Wärmeleitfähigkeit von $0,182 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf.

6.2.2 Rohstoffuntersuchungen

Die Rohstoffe für Bettungsbaustoffe wurden als Sackware angeliefert. Die Herstellerangaben der Korndichten der Rohstoffe wurden stichprobenartig mit einem Heliumpyknometer überprüft, wobei keine signifikanten Abweichungen zwischen den Messwerten und den Herstellerangaben auftraten.

In Tabelle 6.2 sind die Wärmeleitfähigkeiten und die Korndichten der Rohstoffe dargestellt. Die Qualität der Rechenwerte steigt mit dem Feststoffgehalt. Bei quellfähigen Stoffen wie z. B. Bentonit können aber nur Suspensionen mit geringen Feststoffgehalten hergestellt werden, was die Abweichungen bei der Rückrechnung der Wärmeleitfähigkeit des Rohstoffes aus den Messwerten erhöht.

Tabelle 6.2: Wärmeleitfähigkeiten von Rohstoffen für Bettungsbaustoffe

Probe		Korndichte in gcm^{-3}	Feststoffgehalt in %	Wärmeleitfähigkeit der ersten Phase in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Erste Phase	Zweite Phase			
LD Schlacke	Wasser	3,58	54	3,03
Flugasche	Wasser	2,38	54	1,49
CEMII/A-S42,5R	Speiseöl	3,14	39	2,45
Quarzsand Steinbach	Wasser	2,70	56	7,02
Rohmehl zur Zement- herstellung	Wasser	2,73	44	3,77
Kalksteinmehl	Wasser	2,73	50	3,92
Bentonit (Seal 80)	Wasser	2,58	8	2,86
Tonmergel	Wasser	2,74	39	3,08
Concresol	Wasser	2,68	34	3,89
Hüttensand	Speiseöl	2,90	37	1,73
Mikrosilika	Wasser	2,24	22	1,99
CEM I 42,5R-HS	Speiseöl	3,17	35	2,36
Kalkbrechsand	Wasser	2,71	62	3,44

6.3 Teilgesättigte Untersuchungen von bayerischen Böden

Da das Versorgungsgebiet des Projektpartners der E.ON AG erhebliche Teile von Bayern umfasst, wurden vorwiegend bayerische Böden untersucht. Die Ergebnisse werden in einer digitalen Bodenkundlichen Übersichtskarte, die hierfür auf Basis der Bodenkundlichen Übersichtskarte von Bayern im Maßstab 1:500.000 erstellt wurde, hinterlegt. Eine Beschreibung der Böden ist in Tabelle 6.1 gegeben. An einem großen Teil der Böden wurde ein umfangreiches geotechnisches Messprogramm durchgeführt, so dass sie auch als Kalibrierböden für andere Messungen dienen können. Sieblinien, Proctorkurven bzw. Plastizitätseigenschaften, thermische Eigenschaften und weitere Informationen zu allen entnommen Bodenproben sind in Sass et al. (2015b) zu finden. Im Folgenden sind Messungen an einem Teil dieser Böden detailliert dargestellt, und es wird ein Überblick über die Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten gegeben.

Es wurden an verschiedenen Entnahmepunkten der Proben Rammsondierungen mit der manuellen leichten Rammsonde nach DIN 4094-3 zur Ermittlung der Lagerungsdichte durchgeführt. Die leichte Rammsonde ermöglicht eine vergleichende qualitative Beurteilung des Untergrunds über mehrere Bodenhorizonte hinweg.

Tabelle 6.3: Hauptbodenarten nach der Bayerischen Bodenkundlichen Karte BK 500

Nummer	Bodenart
1	„Sand“ (Dolomitasche), z. T. anlehmig bis lehmig, vielfach mit Dolomitbrocken
2	„Sand“ (Alm), z. T. anlehmig bis lehmig, z.T mit Kalktuffbrocken
3	Staublehm, z. T. feinsandig
4	Schwerer und toniger Lehm bis lehmiger Ton, z. T. feinsandig, vielfach mit Kalkscherben
5	Toniger Lehm, lehmiger Ton und Ton z. T. steinig
6	Sand, z. T. anlehmig bis lehmig und geröllhaltig bzw. auf Geröll
7	Stark sandiger Lehm bis lehmiger Sand, geröllreich, auf Schotter (überwiegend Kalkgerölle)
8	Sandiger Lehm, geröllhaltig, z. T. mit Staub und Schluff, auf Schottern (überwiegend Kalkgerölle, jedoch auf Pockinger Heide überwiegend Quarzitgerölle)
9	Sandiger Lehm und Lehm mit wechselndem Gehalt an Sanden, Staubsand und Schluff, z. T. geröllführend auf Schotter (überwiegend Kalkgerölle, jedoch auf Pockinger Heide überwiegend Quarzitgerölle)
10	Auf kurze Entfernung wechselnde Bodenarten von stark sandigem Lehm bis zum Ton, vorwiegend geschiebeführend, z. T. anmoorige Böden und Moorböden
11	Sandiger Lehm, z. T. lehmiger Sand bis stark lehmiger Sand, z. T. geröll- oder geschiebeführend, z. T. auf Schotter
12	Auf kurze Entfernung wechselnde Bodenarten von stark sandigem Lehm bis zum Ton, vorwiegend geschiebeführend, z. T. anmoorige Böden und Moorböden
13	Staubsandiger Lehm, z. T. mit sandig- kiesiger Beimengung, z. T. tonig
14	Sandig- grusiger bis toniger Lehm
15	Schwerer bis toniger Lehm, z. T. mit Kalkscherben, z. T. sandig
16	Lehmiger bis stark lehmiger Sand
17	Lehmiger bis stark lehmiger, glimmerhaltiger Sand, z. T. kiesig und mergelig
18	Grusiger, lehmiger bis stark lehmiger Sand, z. T. steinig, z. T. glimmerhaltig
19	Feinsandiger, blättrig- schluffiger Lehm, z. T. grusig und steinig
20	Sandiger Lehm bis Lehm, z. T. steinig oder geröllführend
21	Lehm mit wechselnden Gehalt an Feinsand, Staubsand und Schluff, z. T. steinig oder geröllführend
22	Lehm bis toniger Lehm, z. T. steinig
23	Toniger Lehm bis Ton, z. T. sandig und steinig
24	Sand, z. T. anlehmig bis lehmig, z. T. toniger Untergrund
25	Sand bis lehmiger Sand, z. T. geröllführend, glimmerhaltig oder schiefersteinig
26	Anlehmiger, steiniger, grusiger Sand
27	Stark lehmiger Sand bis stark sandiger Lehm, z. T. kies- und glimmerführend, z. T. steinig oder auf Geröll
28	Schluffreicher Lehm, z. T. tonig oder steinig, z. T. geröll- oder geschiebeführend
29	Lehmiger bis toniger Sand, z. T. kies und grusführend, z. T. anmoorig, z. T. auf Geröll oder nur sandig- toniges Geröll
30	Feinsandiger bis sandiger Lehm, z. T. tonig, manchmal kies- und grusführend
31	Lehmiger Ton bis Ton, z. T. sandig
32	Anmooriger (organisch- mineralischer) Boden
33	Anmooriger (organisch- mineralischer) Boden
34	Anmooriger (organisch- mineralischer) Boden, kalkreich auf Kalkschotter
35	Niedermoor oder Flachmoor („Moos“)
36	Hochmoor („Filz“)
37	Felsböden auf Karbonatgesteinen (Kalk und Dolomit)
38	Böden auf Kalkgebirgsschutt, sandig-lehmig bis tonig-lehmig, vielfach geröll-, geschiebe- und schuttführend
39	Sandiger Lehm bis anlehmiger Sand, geröllführend, z. T. auf Geröll, Geschiebe oder Schutt

Dabei zeigen die untersuchten Böden in natürlicher Lagerung in 60 bis 70 cm Tiefe meist lockere bis mitteldichte Lagerungen. Die Lagerungsdichte nimmt ab ca. 1,50 m Tiefe zumeist zu. Das Messverfahren sowie die Ergebnisse sind in Anhang 2 detailliert erläutert. Da die Wärmeleitfähigkeit mit der Verdichtung von Böden zunimmt, liegt ein Messwert direkt an den entnommenen Proben zumeist niedriger gegenüber verdichteten Böden in Kabelgräben.

6.3.1 Sande, Lehme und Tone

Die Böden Nummer 1 bis 31 nach der Bodenkundlichen Übersichtskarte BK 500 sind den Bodenarten Sand, Lehm, Ton, bzw. Mischungen hieraus zuzuordnen. Sie sind geotechnisch grundsätzlich für die Bettung von Erdkabeln geeignet. Ein Teil von ihnen kann nach der Beschreibung nach Tabelle 6.3 Geröll oder Schotter enthalten. Im Rahmen der Probennahme wurden zwar auch Lokationen mit Schottern und Geröll vorgefunden. Die Lokationen mit sehr spitzkantigem Material waren jedoch lokal eng begrenzt, so dass für diese Areale im Trassenbau mit überschaubaren Erdbewegungen keine erheblichen Einschränkungen zu erwarten sind. In den folgenden Diagrammen und Tabellen sind die Messergebnisse von vier Böden zur Veranschaulichung der Vorgehensweise bei der Messung bzw. Auswertung ausführlich dargestellt. Die Böden sind in Abbildung 6.4 und die geotechnischen Kennwerte in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4: Geotechnische Kennwerte von Bodenproben aus Bayern

Eigenschaft	Einheit	B 6	B 12	B 26	B 29
Bodenart (nach DIN 18196)		SE (Enggestufter Sand)	UM (Mittelplastischer Schluff)	SU* (Sand-Schluff)	TA (Ausgeprägt plastischer Ton)
Bodenart (nach EN ISO 14688-1)		fS, ms, g', gs	U, t', fs'	S, mg, u'	U, t, fs', ms', gs'
In-situ Wassergehalt	% _{gew.}	6,6	25,3	24,2	23,3
Korndichte	gcm ⁻³	2,63	2,63	2,54	2,61
Lockerste Lagerung	gcm ⁻³	1,36	-	0,85	-
Dichteste Lagerung	gcm ⁻³	1,72	-	1,14	-
Porenanteil bei lockerster Lagerung	-	0,48	-	0,67	-
Porenanteil bei dichtester Lagerung	-	0,35	-	-	-
Fließgrenze w _L	% _{gew.}	-	40,4	-	53,7
Ausrollgrenze w _P	% _{gew.}	-	25,8	-	23,4
Plastizitätszahl I _P	%	-	14,6	-	30,3
Konsistenzzahl I _c	-	-	1,04	-	1,00
Überskornanteil	%	0	5	0	0
Glühverlust	%	0,9	4,2	4,4	6,3



Abbildung 6.4: Bodenproben bayerischer Böden; die Bezeichnungen entsprechen derjenigen in Tabelle 6.4

In Abbildung 6.5 sind die Wassergehalts-/Saugspannungsbeziehungen der vier Böden dargestellt. Typisch ist dabei die frühe Entwässerung des Sandes (B6) und des Sand-Schluffes (B26) bei Saugspannungen von $pF = 1,8$. Die Entwässerung des Sand-Schluffes erfolgt aufgrund des höheren Anteils an Feinstmaterial in einem weiteren Saugspannungsbereich als die des reinen Sandes. Die feinstkornreichen Tone zeigen erst ab $pF = 4$ signifikante Entwässerungen.

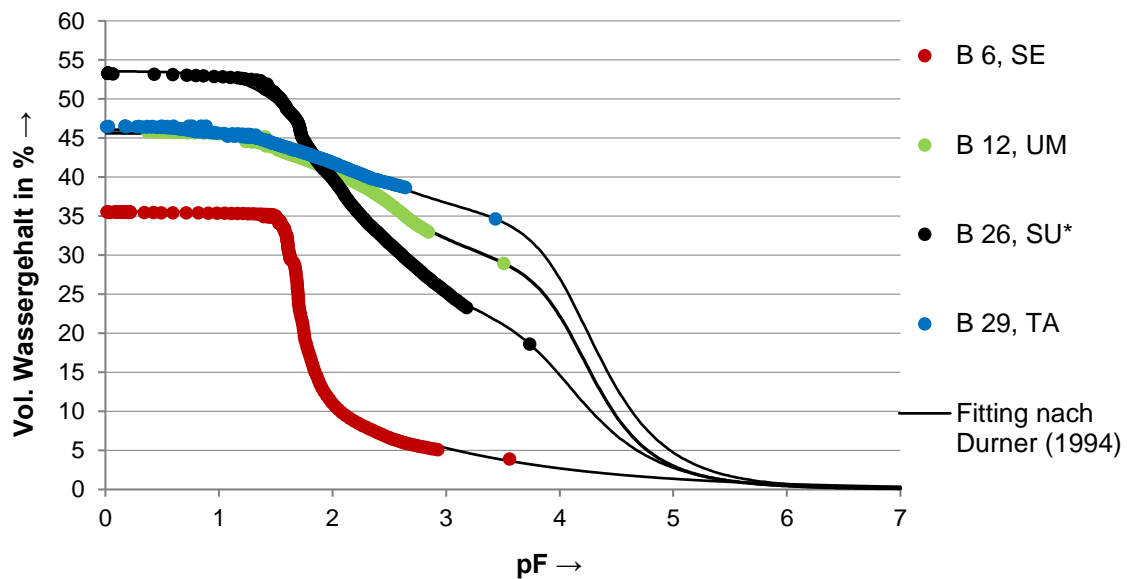


Abbildung 6.5: Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung bayerischer Böden

Entsprechend der Entwässerungscharakteristik ist auch bei der Beziehung zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Saugspannung (Abbildung 6.6) beim Sand bei $pF = 1,8$ ein starkes Abfallen der Wärmeleitfähigkeit erkennbar. Die feinkörnigeren Böden weisen eine höhere thermische Stabilität auf. Insgesamt ist das Niveau der Wärmeleitfähigkeit beim Sand aufgrund des Quarzanteils höher als bei tonigen Böden.

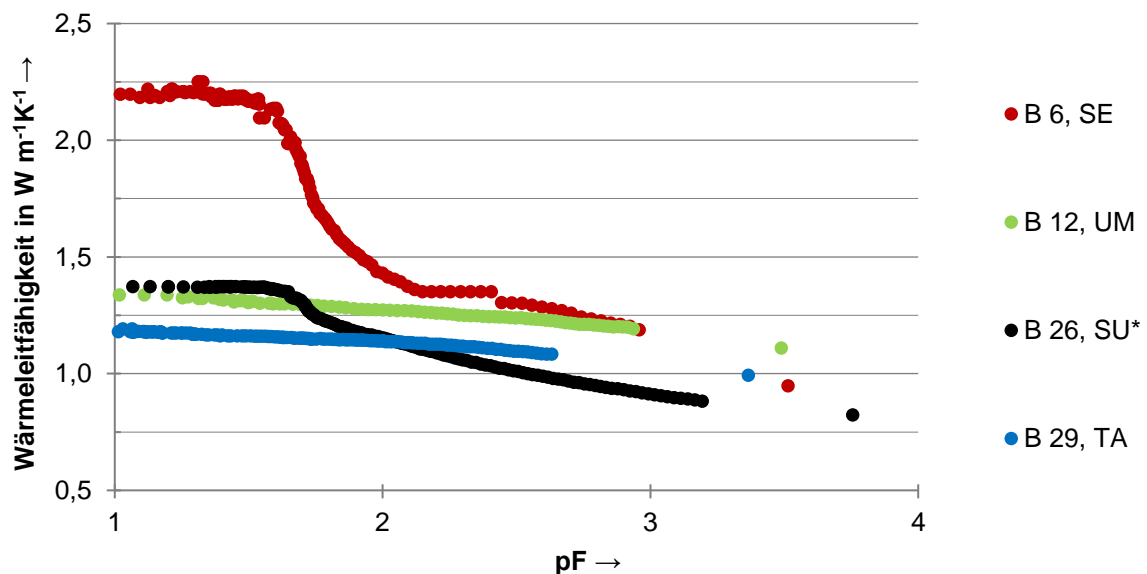


Abbildung 6.6: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Saugspannung bayerischer Böden

6.3.1.1 Rechnerische Anpassung der Messwerte

Im Folgenden werden für die vier Böden die Wassergehalts-/Wärmeleitfähigkeitsbeziehungen einzeln dargestellt. Dabei erfolgt eine Anpassung der Messwerte nach dem in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Modell nach Campbell et al. (1994). Auf Basis der Kurvenanpassung an die Messwerte bei Raumtemperatur in einem definierten Verdichtungszustand werden mittels dieses Modells die Wärmeleitfähigkeiten für die Böden nach einer Verdichtung des Porenraumes um 6 % berechnet. Die Verdichtung des Porenraumes von 6 % entspricht der durchschnittlichen Verdichtbarkeit der Böden, die in den geotechnischen Untersuchungen mittels des Proctorversuches nach DIN 18127 ermittelt wurde. Hinsichtlich der berechneten Kurven bei Verdichtung ist zu beachten, dass eine vollkommene Sättigung schon bei geringeren volumetrischen Wassergehalten auftritt. Dies hat zur Folge, dass die Berechnungen nur bis zu geringeren Wassergehalten ausgeführt werden können. Die Berechnung erfolgt mittels der Software Thermal Conductivity Calculator der Firma Decagon Devices. Dabei werden gleiche Werte x_{w0} , q_0 und g_a nach Abschnitt 3.3.2 für alle sandigen Böden, die aus zahlreichen Messungen als Mittelwerte festgelegt wurden, verwendet. Analog werden gleiche, aber zu den Sanden unterschiedliche Werte für alle lehmigen Böden festgelegt.

Für λ_m werden Messwerte bei definierten Wassergehalten ermittelt. Die hieraus errechneten Kurven zeigen für homogene Böden bereits gute Übereinstimmungen (Abbildung 6.7 bis 6.10). Bei Boden 6 und 29 wird die Wärmeleitfähigkeit bei der Kurvenanpassung bei niedrigen Wassergehalten unterschätzt. Die höher liegenden Messwerte können auch von einem verbesserten Kontakt aufgrund von Schrumpfung bei Wasserentzug zwischen Messsonde und Boden herrühren. Somit kann mit einzelnen Messwerten der Wärmeleitfähigkeit bei definierten Wassergehalten und Verdichtungen eine Berechnung der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Wassergehalten, Dichten und Temperaturen erfolgen. Zusätzlich muss die Bodenart (Sand, Lehm oder Ton) bestimmt und in der Software hinterlegt werden. Die Aufnahme nahezu vollständiger Messkurven der Wärmeleitfähigkeit zu verschiedenen Verdichtungen und Wassergehalten wären genauer. Deren Bestimmung im Verdunstungsversuch ist aber mit Messdauern von bis zu einer Woche wesentlich aufwändiger. Die Berechnung auf Basis von einzelnen Messwerten stellt jedoch einen erheblichen Fortschritt gegenüber den bisher angenommenen Normwerten dar. Die Grenzen dieser Vorgehensweise liegen zurzeit bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von stark inhomogenen Böden wie z. B. Tonen mit Schotteranteil.

In der Natur treten in der Tiefe, in der Erdkabel verlegt sind, in Lehm- und Tonböden Saugspannungen zwischen der Feldkapazität von 63 hPa ($p_F = 1,8$) und 1.000 hPa ($p_F = 3$) auf. Dies ist mit Wassergehalten von mehr als 20 %_{Vol.} verbunden. Für Sandböden liegen die

Saugspannungen zwischen 63 hPa und 500 hPa ($pF = 2,7$), was in der Regel zu Wassergehalten größer 4 %_{Vol.} führt. Die Wärmeleitfähigkeiten bei $pF = 1,8$ und $2,7$ bzw. den zugehörigen Wassergehalten werden deswegen als unterer Grenzwert gesehen. Höhere Saugspannungen bis zum permanenten Welkepunkt bei 15000 hPa ($pF 4,2$) sind nur bei Durchwurzelung des Bodens und Wasserentzug durch hohe Pflanzen (Bäume) zu finden. Die genannten Grenzwerte sind in Abbildung 6.7 bis Abbildung 6.10 eingezeichnet (Trinks, 2010; Sass et al., 2015; AD-HOC-AG Boden, 2005).

Als Feldkapazität wird der volumetrische Wassergehalt bezeichnet, der im Boden bei definierten Saugspannungen von $pF \geq 1,8$ gebunden ist. Im Freiland entspricht dies der Menge Wasser, die ein zunächst wassergesättigter Boden gegen die Schwerkraft nach 2 bis 3 Tagen noch halten kann. Die Feldkapazität wird in mitteleuropäischen Breiten meistens gegen Ende des Winters (März/April) erreicht. Auch dann ist der Boden nicht vollständig mit Wasser gesättigt; in den Grob- und Makroporen ist noch Luft enthalten. Der Boden kann somit bei Niederschlag einen höheren Wassergehalt aufweisen, als bei der Messung der Feldkapazität ermittelt wurde (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

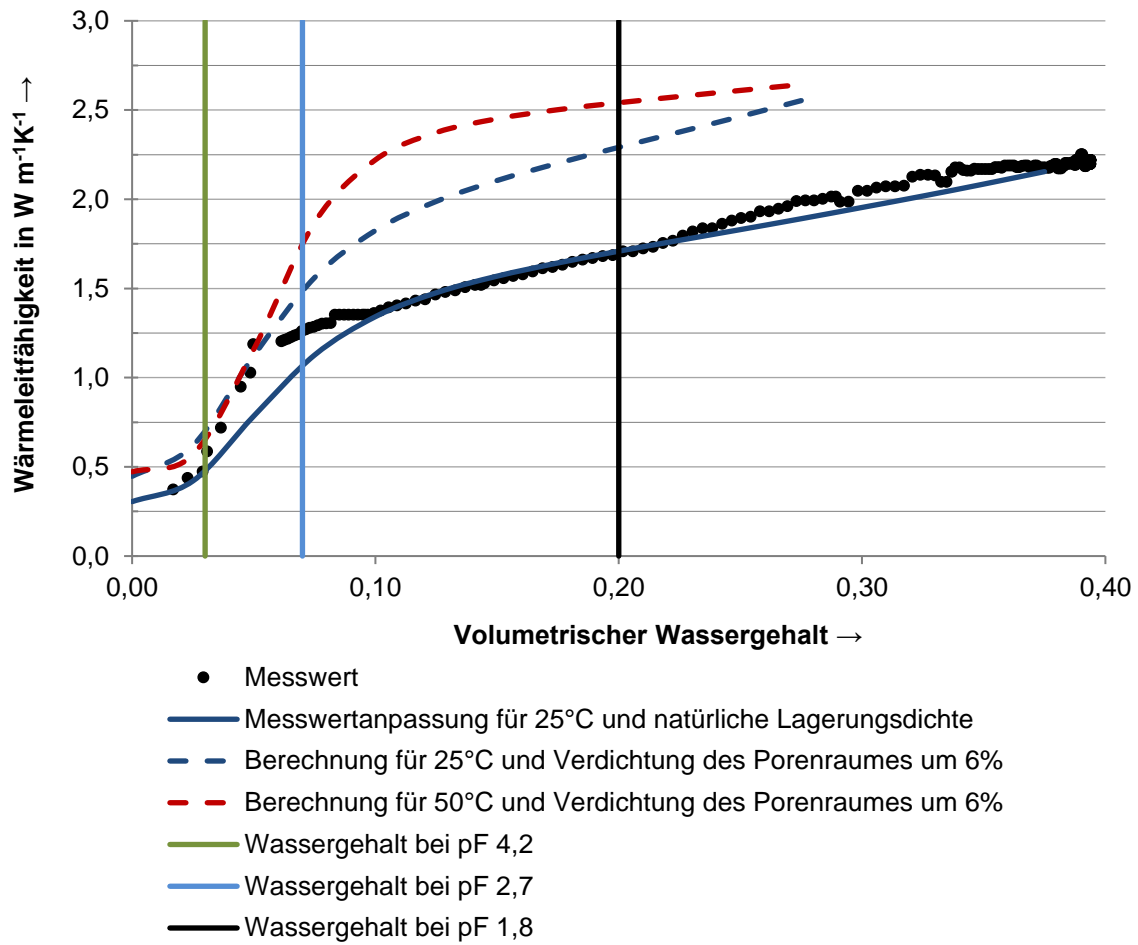


Abbildung 6.7: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 6 (SE)

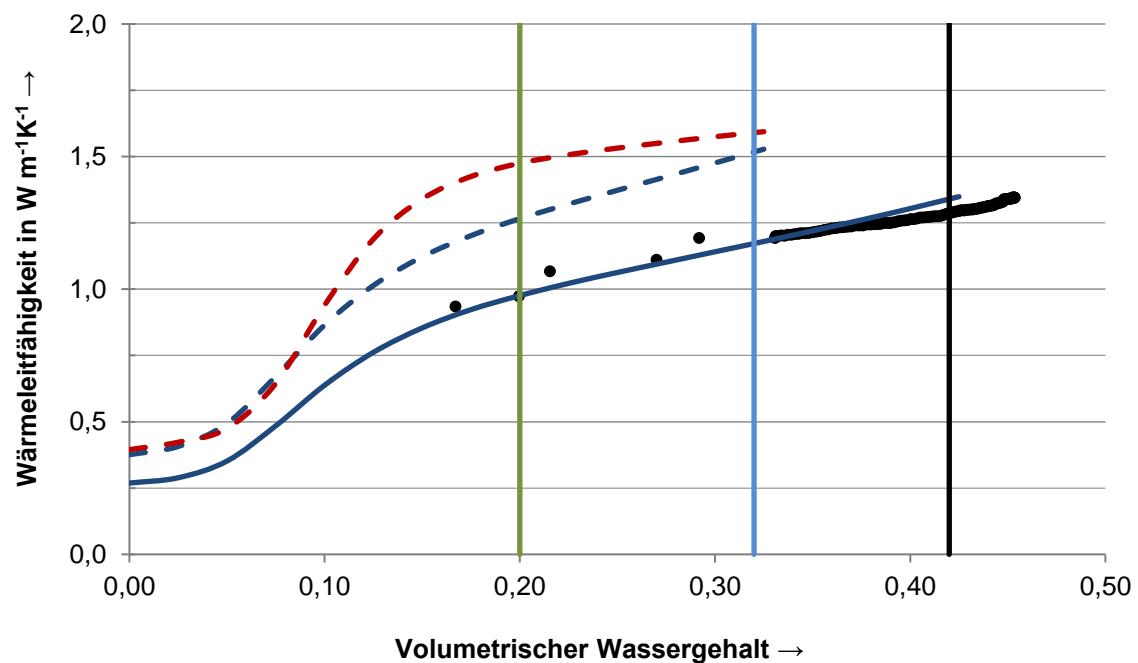


Abbildung 6.8: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 12 (UM)

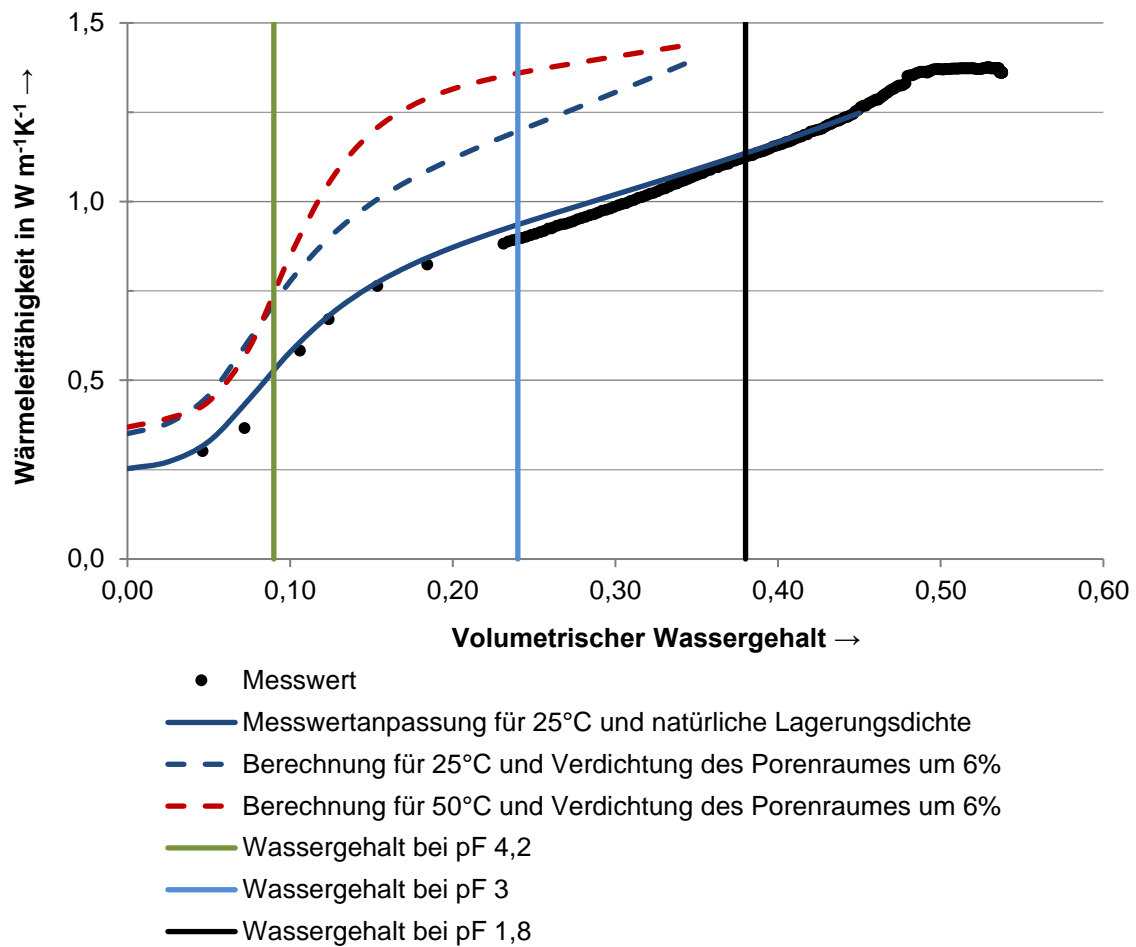


Abbildung 6.9: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 26 (SU*)

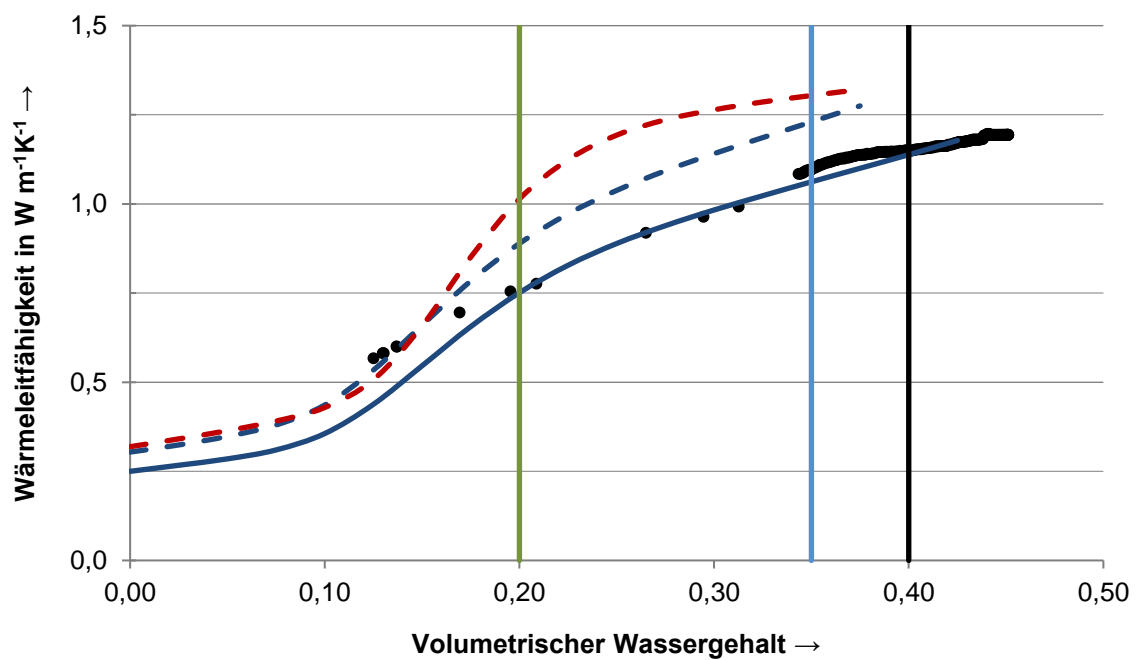


Abbildung 6.10: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 29 (TA)

6.3.2 Anmoorige Böden und Moorböden

6.3.2.1 Anmoorige Böden

Anmoorige Böden sind Böden mit Humusbestandteilen, die unter dem Einfluss von Stau- bzw. Grundwasser entstanden sind. Sie bestehen aus einer dunkel gefärbten Mischung von mineralischer und feinverteilter organischer Substanz, letztere mit Gehalten von 15 bis 30 %_{Gew.} Unter Wald ist der anmoorige Horizont in der Regel 20 bis 40 cm mächtig (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Die Verbreitung solcher Böden in Bayern ist in der Bayerischen Bodenkundlichen Karte BK 500 (Boden Nummer 32 bis 34) dargestellt. Karten mit Detailaufnahmen einzelner Verbreitungsgebiete der Böden sind in Sass et al. (2015) dargestellt.

Normalerweise bestimmen in Böden die Körner der anorganischen Komponente den Charakter eines Bodens. Nur bei hohen Anteilen an organischer Substanz, wie sie anmoorige und moorige Böden aufweisen, wird der Charakter der mineralischen Körner durch deren Eigenschaften überdeckt (Blume et al., 2010).

Ein Anteil von 15 %_{Gew.} Organik entspricht in-situ einem volumetrischen Anteil von mindestens 50 % organischer Bestandteile. Die Trockenrohdichte von Torf wurde mit $1,34 \text{ gcm}^{-3}$ gemessen. Die Wasseraufnahme betrug unter ungestörten Bedingungen mindestens 200 %_{Gew.}. Die im Rahmen der Felduntersuchungen in Bayern vorgefundenen Böden entsprachen oft nicht der Definition anmooriger Böden, da ihr Organikgehalt zu gering ist. Statt der Detailuntersuchung dieser Böden, die in den nichtorganischen Bestandteilen weitgehend mit anderen bayerischen Böden übereinstimmen, wurde deshalb die Auswirkung des Gehaltes von organischen Bestandteilen im Boden über eine Zugabe organischer Bestandteile in andere bayerische Böden untersucht (Eberhardt, 2015).

Bei Böden mit 15 % organischem Anteil reduziert sich die Wärmeleitfähigkeit vom organikfreien Ausgangsmaterial sehr stark, was oft Wärmeleitfähigkeiten unter $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ mit sich bringt. Höhere Organikgehalte führen zu den an Moorböden gemessenen Werten. Die Messwerte für Lehm-Organik-Gemische sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit des Lehms vor der Mischung betrug $1,18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und die der organischen Bestandteile $0,15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Abbildung 6.12). Die Wärmeleitfähigkeit des Lehmes wurde durch 15 % organische Substanz um mehr als 50 % gegenüber dem Ausgangswert herabgesetzt, zudem nahm die Trockenrohdichte des Bodens erheblich ab. Um die Messungen bei vergleichbaren Verdichtungen durchzuführen, wurde die Verdichtung im Proctortopf nach DIN 18126 jeweils mit 3 und 7 Schlägen durchgeführt. Ähnlich niedrige Wärmeleitfähigkeiten wurden an organikreichen Böden von Abu-Hamdeh & Reeder (2000) gemessen. Im

Bereich von 15 bis 30 % Organikanteil reduzierten sich die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten von 0,24 auf 0,17 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Für diese Messungen wurde aber keine Verdichtungsarbeit angegeben.

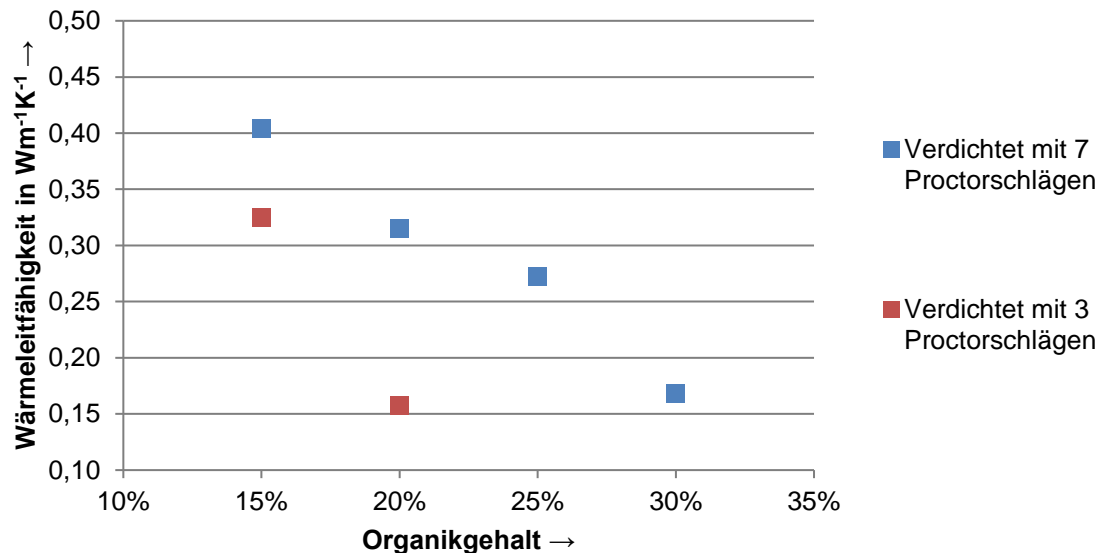


Abbildung 6.11: Wärmeleitfähigkeit von Lehm-Organik-Gemischen in Abhängigkeit des Organikgehaltes

In den aufgesuchten Gebieten wurden die anmoorigen Böden nach der oben genannten Definition nur kleinräumig und nur in den obersten Dezimetern vorgefunden. Deswegen ist davon auszugehen, dass diese Böden nicht bis in die Kabelebene reichen, bzw. dass beim Einbau von Kabeln eine Durchmischung mit darunterliegenden organikärmeren Schichten stattfindet, was zu individuell zu begutachtenden und möglicherweise zu höheren Wärmeleitfähigkeiten führt.

6.3.2.2 Moorböden

Als Moore nach AD-HOC-AG BODEN (2005) werden Flächen mit Böden aus organischen Horizonten mit mehr als 30 cm Mächtigkeit bezeichnet. Die organischen Horizonte werden aus Resten torfbildender Pflanzen an der Oberfläche unter Wasserüberschuss gebildet. Oft sind Moore wassergesättigt. Die Verbreitungsgebiete von Mooren in Bayern sind in der Bayerischen Bodenkundlichen Karte BK 500 und Karten mit Detailaufnahmen einzelner Verbreitungsgebiete der Böden sind in Sass et al. (2015) dargestellt.

Für die Moorböden (Böden 35 und 36 nach BK 500) wurde die Wärmeleitfähigkeit von Torf in Abhängigkeit des Wassergehaltes untersucht, und es wurden Proben aus einem bayerischen Niedermoor entnommen und untersucht (Tabelle 6.5). Die Ergebnisse korrelieren mit Rechenwerten nach dem Modell von Côté & Konrad (2006). Zusätzlich wurden temperaturabhängige Untersuchungen durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeiten steigen bei 50 °C um ca. $0,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gegenüber Messwerten bei Raumtemperatur an (Abbildung 6.12). Grundsätzlich wurden sehr niedrige Wärmeleitfähigkeiten vorgefunden. Torf weist ein starkes Schwinden während der Trocknung auf, was Veränderungen in der Struktur mit sich bringt.

Moorböden können daher als Wärmedämmer eingestuft werden. In durchgehend wasser-gesättigten Bereichen können aufgrund von in Poren eingeschlossener Restluft Wärme-leitfähigkeiten von ca. $0,35 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ vorliegen.

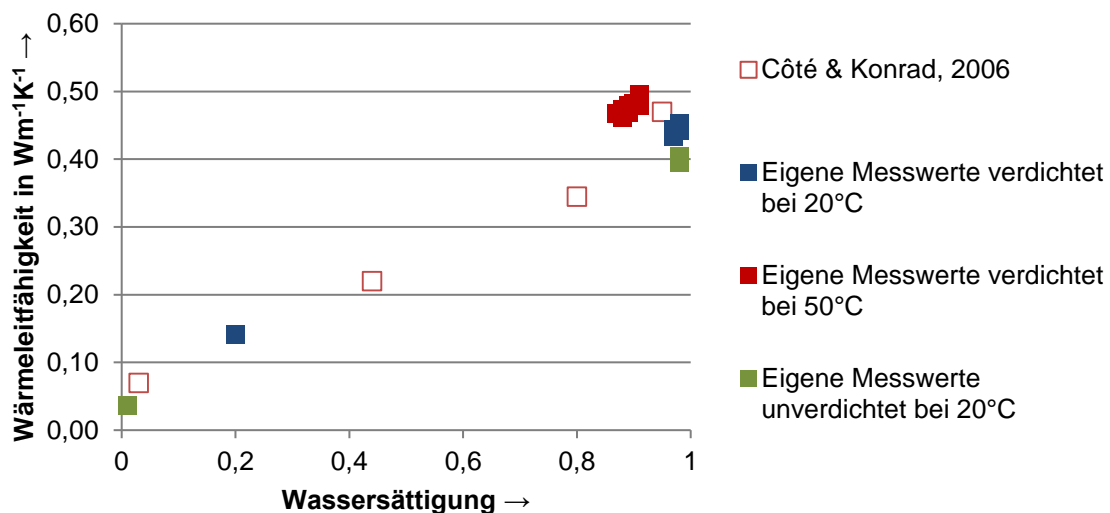


Abbildung 6.12: Wärmeleitfähigkeit von Hochmoortorf in Abhängigkeit von der Wassersättigung

Tabelle 6.5: Messwerte einer bayerischen Niedermoorprobe (Boden 35)

Beschreibung	Niedermoor oder Flachmoor („Moos“)
Trockendichte bei Entnahme in gcm^{-3}	0,36
Porenanteil	0,79
Wassergehalt bei Entnahme	0,50
Wärmeleitfähigkeit bei Entnahmedichte und Entnahmewassergehalt in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,28
Wärmeleitfähigkeit bei Entnahmedichte und Wassersättigung in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,69
Berechnete Wärmeleitfähigkeit bei Entnahmewassergehalt und Verdichtung des Porenraumes um 6 % in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,32

6.3.2.3 Steinige Böden

Es wurden bei den Probennahmen in Bayern in zahlreichen Böden Steine angetroffen (Abbildung 6.13). Große Steine werden für die Laboruntersuchung der Wärmeleitfähigkeit der Böden entnommen. Sie beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit des Bodens in der Regel positiv. Allerdings ist die Verteilung der Steine im Boden inhomogen. Eine Abschätzung der Auswirkung von Steinen im Boden kann über die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Zwei-Komponenten-Gemischen nach Abschnitt 3.3.1 erfolgen.



Abbildung 6.13: Lehm Boden mit Muschelkalksteinen (bayerische Rhön, September 2014)

Der Boden 37 ist nach der Bayerischen Bodenkundlichen Karte BK 500 ein Felsboden. Zusätzlich wurden in Bereichen des Bodens 38 (Abbildung 6.14) Felsaufschlüsse vorgefunden. Da auch in Fels Erdkabel in eine Bettung eingebaut werden, kann für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit das untere 10 % Quantil von Messungen an trockenen Felsproben zur Bemessung verwendet werden. Eine individuelle Untersuchung von Fels und Steinen kann im trockenen Zustand mittels der Optical-Scanning-Methode (Abschnitt 3.2) an Bohrkernen oder Handstücken durchgeführt werden.

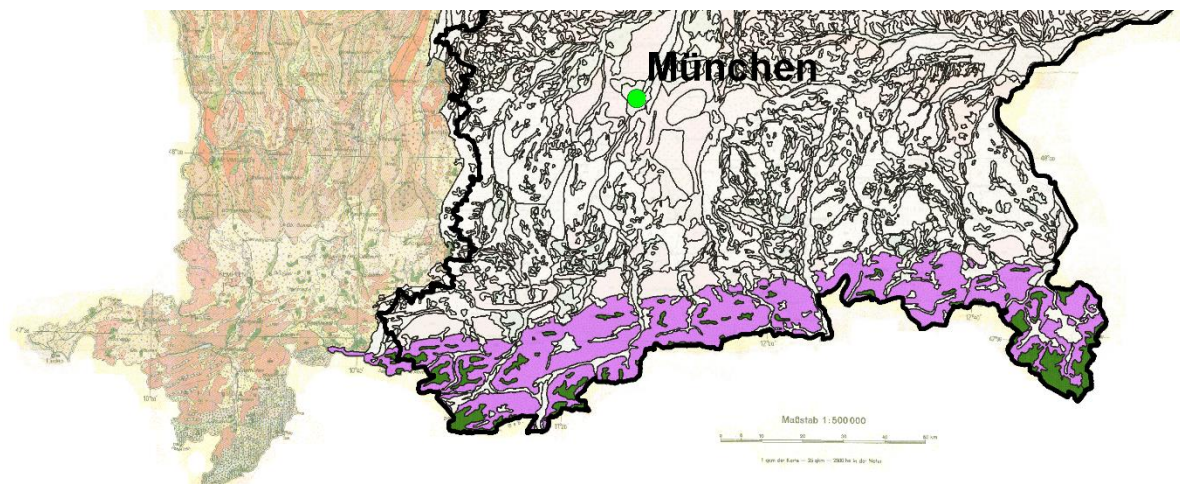


Abbildung 6.14: Verbreitung von Felsböden (lila und grün markiert) im Projektgebiet in Bayern

In Homuth (2014) wurden umfangreiche Untersuchungen an Kalksteinen aus Bayern durchgeführt. Kalk- und Dolomitsteine sind die gesteinsbildenden Stoffe der Felsböden 37 und 38 und können als Schutt- bzw. Geröllanteil auch in vielen anderen Böden auftreten. Explizit ist dies für die Böden Nummer 1, 2, 4, 7, 8, 9, 15, 34 nach der Bodenkundlichen Karte benannt. Untersucht wurden die Kalke des Malm α bis Malm ζ mit dem Ergebnis leicht ansteigender Wärmeleitfähigkeiten in derselben Reihenfolge (Abbildung 6.15). Bedingt ist dies durch die Abnahme des Tongehaltes und Zunahme der Dolomitisierung zum Oberen Malm hin.

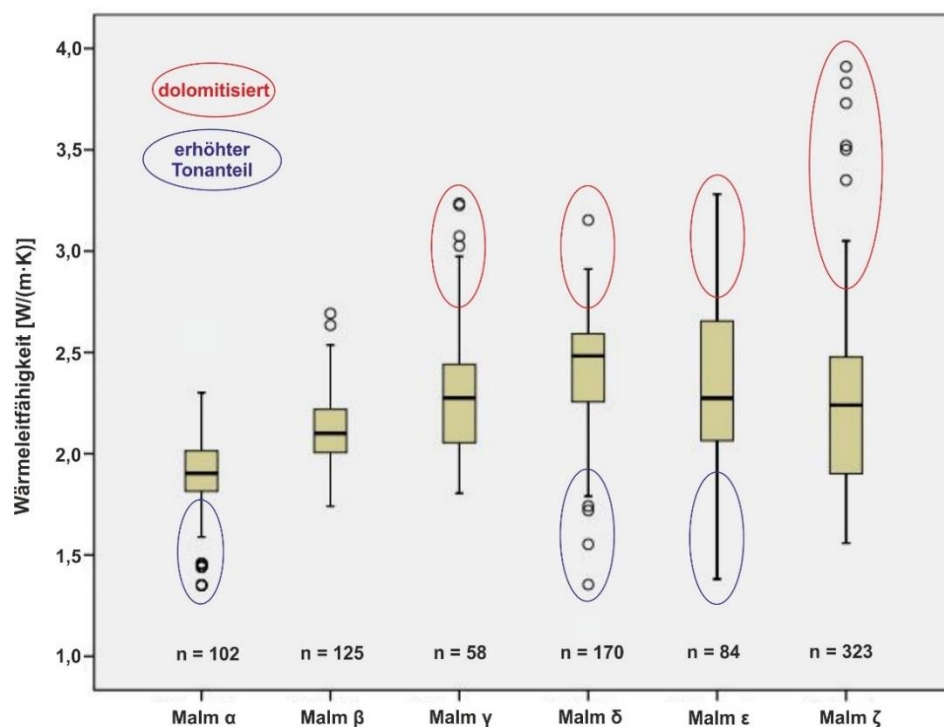


Abbildung 6.15: Messwerte der trockenen Wärmeleitfähigkeiten von Malmkalksteinen (Homuth, 2014)

Auch die Rohdichten (Abbildung 6.16) der Kalksteine streuen im Vergleich zu Böden in engen Grenzen. Unter Verwendung der Korndichten (Abbildung 6.17) berechnen sich Porananteile von maximal 15 % und im Regelfall von 10 %.

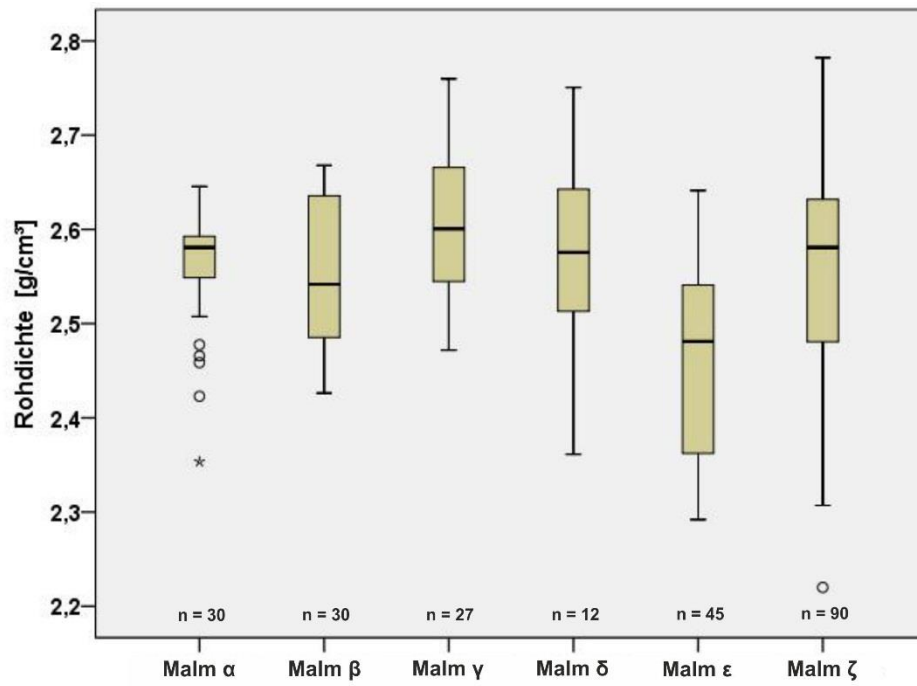


Abbildung 6.16: Messwerte der Rohdichten von Malmkalksteinen (Homuth, 2014)

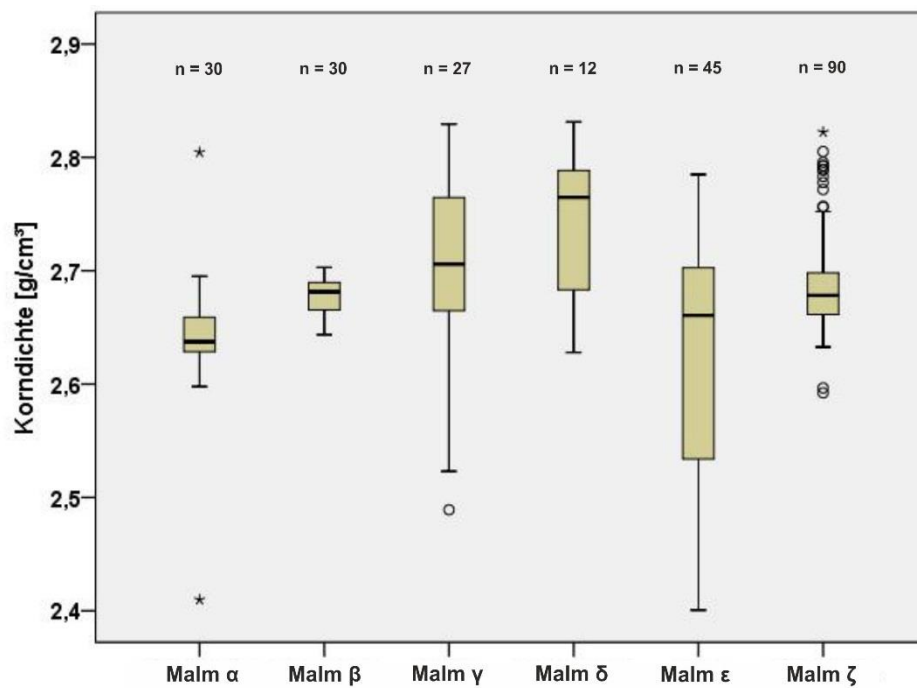


Abbildung 6.17: Messwerte der Korndichten von Malmkalksteinen (Homuth, 2014)

6.3.3 Weitere Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit

6.3.3.1 Kontakt von grobkörnigen Böden mit feinkörnigen Böden

In Bayern wurden bis in die 1990er Jahre Sandbettungen verwendet. Ein Großteil der natürlich anstehenden bayerischen Böden ist nach Tabelle 6.3 den Tonen und Lehmen zuzuordnen. Aufgrund des geringen kapillaren Steighöhen in Sanden im Gegensatz zu den feinkörnigen Böden kann das Wasser in der Sandbettung mit steigenden Saugspannungen vom umgebenden Boden aufgenommen und so die Bettung trockengelegt werden. Ein Extremfall kann auf dem Erdkabeltestfeld nach Abschnitt 7.1 beobachtet werden. Hier liegen im Sand unterhalb des Flüssigbodens mehrere Wassergehaltssensoren. Der Flüssigboden besitzt eine feinkörnige Matrix und ein sehr hohes Saugvermögen, wodurch Wasser aus Regen bzw. Schneeschmelze von dem Flüssigboden aufgenommen wird und nur schwer zu dem Sand vordringen kann. Die kapillaren Steighöhen im Sand von maximal einem Meter verhindern die Aufnahme des Grundwassers, das einen Flurabstand von mehr als 10 m aufweist. Deswegen liegen die Wassergehalte in diesem Bereich im Sand dauerhaft unter 5 %_{Vol.}, während in den angrenzenden Bereichen im Sandfeld Wassergehalte zwischen 10 und 16 %_{Vol.} auftreten. Ein Auftreten ist in der Realität individuell zu begutachten. Hierfür können Grundwassergleichenpläne ausgewertet sowie eine Ortsbegehung und stichpunktartige Messungen durchgeführt werden.

6.3.3.2 Durchwurzelung der Kabelbettung

Die Durchwurzelung eines Bodens zieht im Wesentlichen drei Folgen für dessen thermische Eigenschaften nach sich:

- Entstehung von Saugspannungen bis zum permanenten Welkepunkt ($pF = 4,2$). Mehr als 50 % der unverdichteten Böden weisen nach Abschnitt 6.3.5 bei dieser Saugspannung Wärmeleitfähigkeiten kleiner $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf.
- Erhöhung des organischen Anteils entsprechend dem Wurzelgehalt. Holz (Wärmeleitfähigkeit 0,1 bis $0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), Wurzeln, und Torf weisen ähnliche thermische Eigenschaften auf. Damit wirken die Wurzeln wärmedämmend im Boden.
- Auflockerung des Bodens bringt durch Verringerung der Kornkontakte eine zusätzliche Reduktion der Wärmeleitfähigkeit.

6.3.3.3 Minerale mit wärmedämmender Wirkung

Im Boden 17 wurden Glimmer vorgefunden. Glimmer sind blättchenförmig ausgebildete $\text{KMg-Fe-Al-Silicate}$ mit sehr guter Spaltbarkeit, die auf dem schichtförmigen Aufbau der Struktur beruht (Schicht-, Blatt- oder Phyllosilicate). Die häufigsten Glimmer sind der helle Muskovit und der dunkel gefärbte Biotit. Muskovit entsteht vorwiegend metamorph, aber auch magmatisch und sedimentär. Biotit entsteht meist magmatisch und ist umso dunkler,

je höher sein Fe-Gehalt ist (Blume et al., 2010). Glimmer wirken wärmedämmend im Boden. Dies führt bei Boden 17 zu Messwerten der Wärmeleitfähigkeit von $0,8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ im wassergesättigten Zustand und zu einer Wärmeleitfähigkeit von unter $0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ im trockenen Zustand. Glimmer können im Feld u. a. an einem metallischen Glanz oder Perlmuttglanz erkannt werden (Abbildung 6.18).

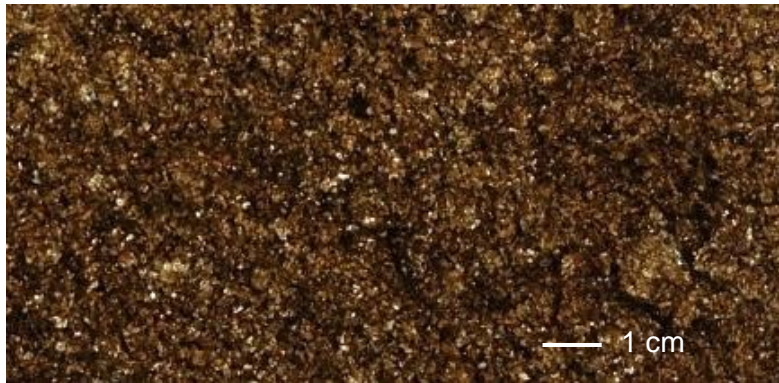


Abbildung 6.18: Boden 17 mit hohem Anteil an Schichtsilikaten (metallisch glänzende Partikel)

6.3.4 Wärmekapazitäten bayerischer Böden

Die Wärmekapazitäten der Böden wurden an unterschiedlichen ofengetrockneten Proben der bayerischen Böden und der Testfeldböden mittels eines Differenzstrom-Kalorimeters bestimmt. Die Ergebnisse der Messungen korrelieren mit den Messergebnissen von Böden in Farouki (1986). Es ergeben sich Variationen in der Wärmekapazität der trockenen Böden bei 20°C von $0,74$ bis $0,88 \text{ Jg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Abbildung 6.19 und 6.20). Die Nummerierung in den Abbildungen erfolgt nach der Nummerierung in der Bodenkundlichen Übersichtskarte von Bayern BK 500, und die Testfeldböden (nach Abschnitt 7.1) sind als Sand, Ton und Lehm benannt. Mit steigender Temperatur ist bei allen Böden ein linearer Anstieg der Wärmekapazität erkennbar. Die Messergebnisse zeigen, dass die Berechnung auf Basis des Mittelwertes der Wärmekapazitäten aus diesen Messungen hinreichend für die Anwendung ist und individuelle Untersuchungen nicht zwingend notwendig sind.

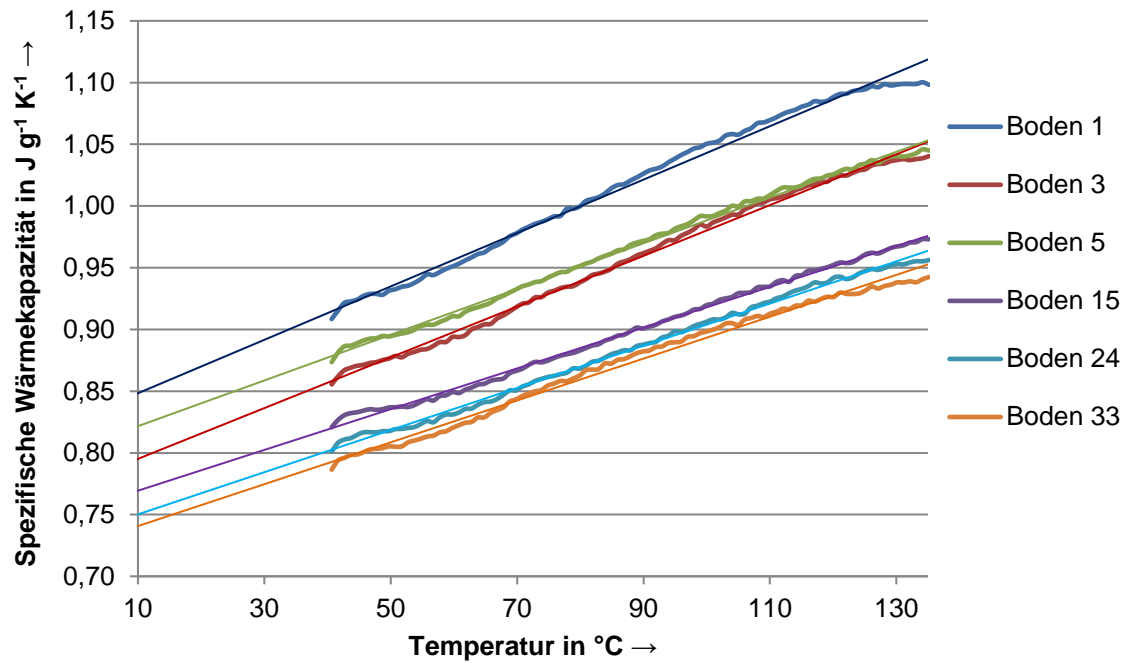


Abbildung 6.19: Spezifische Wärmekapazitäten von ofengetrockneten bayerischen Böden in Abhängigkeit der Temperatur

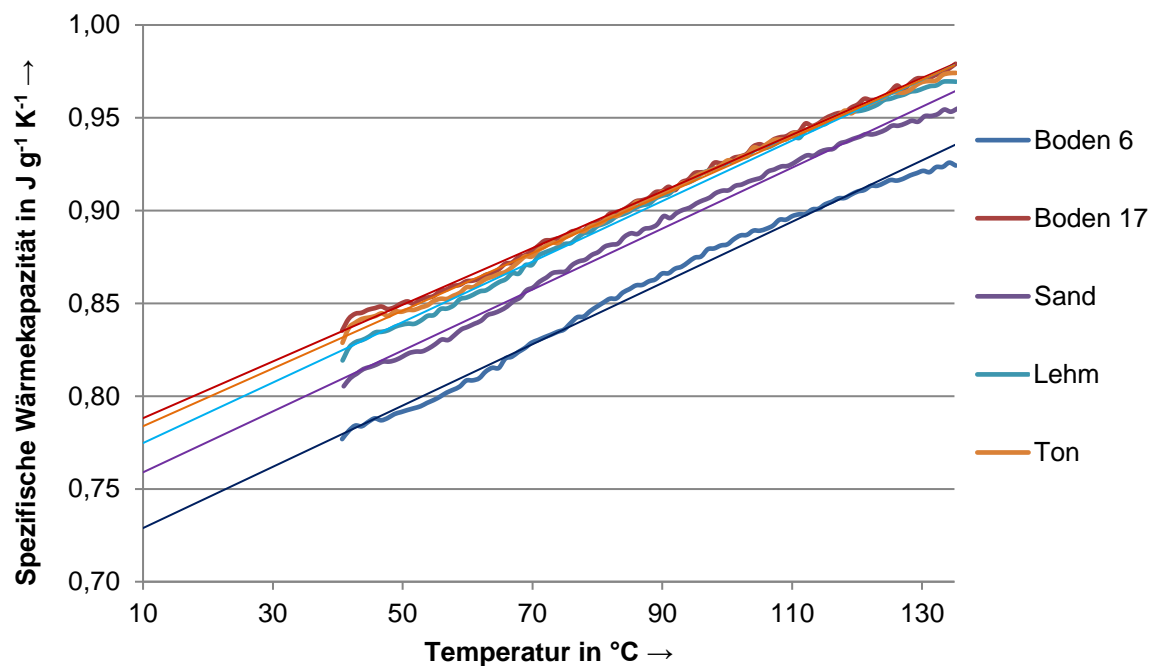


Abbildung 6.20: Spezifische Wärmekapazitäten von ofengetrockneten bayerischen Böden und der Testfeldböden Sand, Lehm und Ton in Abhängigkeit der Temperatur

Die Wärmekapazität einer Mischung ergibt sich aus der gewichteten Summe der Wärmekapazitäten ihrer Bestandteile nach Gleichung (6.1). In Tabelle 6.6 sind Literaturwerte für Wärmekapazitäten von Bodenbestandteilen bei verschiedenen Temperaturen angegeben.

Die Messwerte der untersuchten Böden liegen zu diesen Angaben in einem plausiblen Bereich.

$$c_{Boden} = \sum (c_K \cdot \theta_K) \quad (6.1)$$

Tabelle 6.6: Wärmekapazitäten verschiedener Bodenbestandteile (Daten: Bachmann, 2005)

Bodenbestandteile	Wärmekapazität in J g ⁻¹ K ⁻¹	Temperatur in °C
Quarz	0,76	10
Tonminerale	0,76	10
Organische Substanz	1,93	10
Wasser	4,19	10
Eis	2,04	0
Quarz	0,8	55-60
Kaolinit	0,94	55-60
CaCO ₃	0,85	55-60

Aufgrund der großen Differenz zwischen der Wärmekapazität von Wasser und der Wärmekapazität der Bodenmatrix und geringen Variabilität der Wärmekapazitäten der untersuchten trockenen Böden wird die Gesamtwärmekapazität des Bodens maßgeblich vom Wassergehalt und der Lagerungsdichte bestimmt. In Abbildung 6.21 sind die Bereiche zwischen minimalen und maximalen Messwerten der Wärmekapazitäten der Böden bei 20°C (nach Abbildung 6.19 und 6.20) in Abhängigkeit von Wassergehalt und Lagerungsdichte dargestellt. Der Fehler, der sich aus der Verwendung einer mittleren Wärmekapazität der Bodenmatrix für die Berechnung der Gesamtwärmekapazität des Bodens ergibt, ist grün dargestellt und liegt bei volumetrischen Wassergehalten im Boden von 20 bis 30 % unterhalb 5 %. Für Bodentemperaturen von 70°C erhöht sich die maximale Abweichung bei der Berechnung um 3 %.

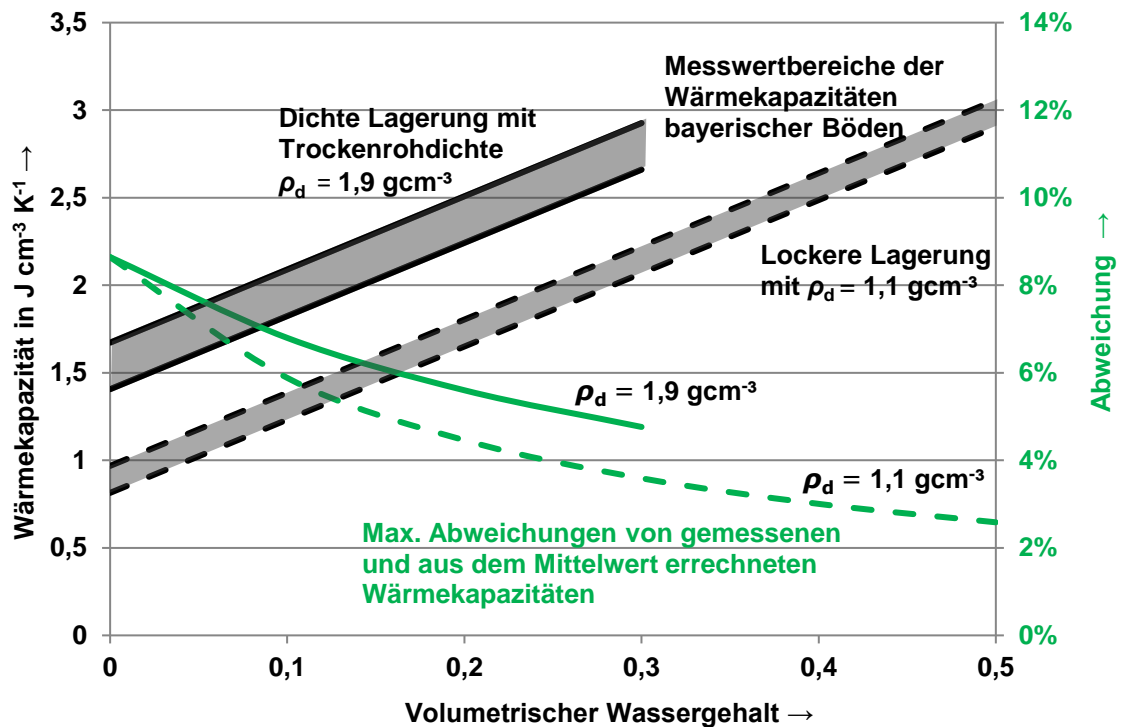


Abbildung 6.21: Wärmekapazitäten bayerischer Böden bei 20°C in Abhängigkeit des Wassergehaltes

Für die Berechnung der Wärmekapazität im Bereich von 0 bis 70 °C wird deswegen folgendes Vorgehen angewendet. Die Berechnung der temperaturabhängigen Wärmekapazität trockener Böden erfolgt unter Verwendung des Mittelwerts der Steigung der Regressionsgeraden mit dem Skalierparameter b und dem Mittelwert der Messwerte der Wärmekapazität c_{KB} bei 0 °C nach Gleichung (6.2).

$$c_K = (b \cdot T + c_{KB}) \quad (6.2)$$

Einsetzen von Gleichung (6.2) in Gleichung (6.1) und Addition der Wärmekapazität des Wasseranteils im Boden ergibt die temperaturabhängige volumetrische Wärmekapazität feuchter Böden c_B nach Gl (6.3).

$$c_B = \theta_B \cdot \rho_{KB} (b \cdot T + c_{KB}) + \theta_W \cdot c_{KW} \quad (6.3)$$

Mit:

θ_B	Volumenanteil Feststoff
b	0,00175 J g ⁻¹ K ⁻²
c_{KB}	0,76 J g ⁻¹ K ⁻¹
ρ_{KB}	2,65 kgm ⁻³
θ_W	Volumenanteil Wasser
c_{KW}	4,18 J g ⁻¹ K ⁻¹

Aufgrund der geringen Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser im Bereich von 0 bis 70 °C kann der Wert in Gleichung (6.3) als Konstante eingesetzt werden. Eine Berechnung statt der Messung wird auch in Dehner et al. (2007) vorgeschlagen. Die Parameter zur Berechnung weichen leicht gegenüber den hier verwendeten ab, was möglicherweise daran liegt, dass die Datengrundlage Messwerte von Böden aus den USA bilden. Die Bestimmung des Feststoffanteils im Boden erfolgt durch Messung der Trockenrohdichte. Die Bestimmung des Wassergehaltes kann durch Ofentrocknung oder mittels Frequency-Domain-Reflectometry erfolgen. Die Temperaturleitfähigkeit kann aus der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität nach den Gleichungen in Abschnitt 2.4.1 berechnet werden.

6.3.5 Bewertung für den Trassenbau

Die Messwerte der untersuchten bayerischen Böden werden statistisch bewertet. In Abbildung 6.22 sind die geordneten Wärmeleitfähigkeiten aller untersuchten Böden im Zustand der Entnahmedichte und des Entnahmewassergehaltes dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeiten der Böden liegen in diesem Zustand zum großen Teil zwischen 1 und 1,5 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Die niedrigen Wärmeleitfähigkeiten weisen im Wesentlichen die moorigen und anmoorigen Böden und Böden mit hohen Glimmer- bzw. Tuffanteilen auf. An den orange markierten Böden wurden bei der Messung Nadelsonden mit besonders dünner Bauform verwendet. Bei deren Verwendung gehen die niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten des Feinstkornanteils in der direkten Umgebung der Sonden stärker ein. Die natürliche Wärmeleitfähigkeit liegt bei diesen Böden ca. 12 % über den gezeigten Labormesswerten.

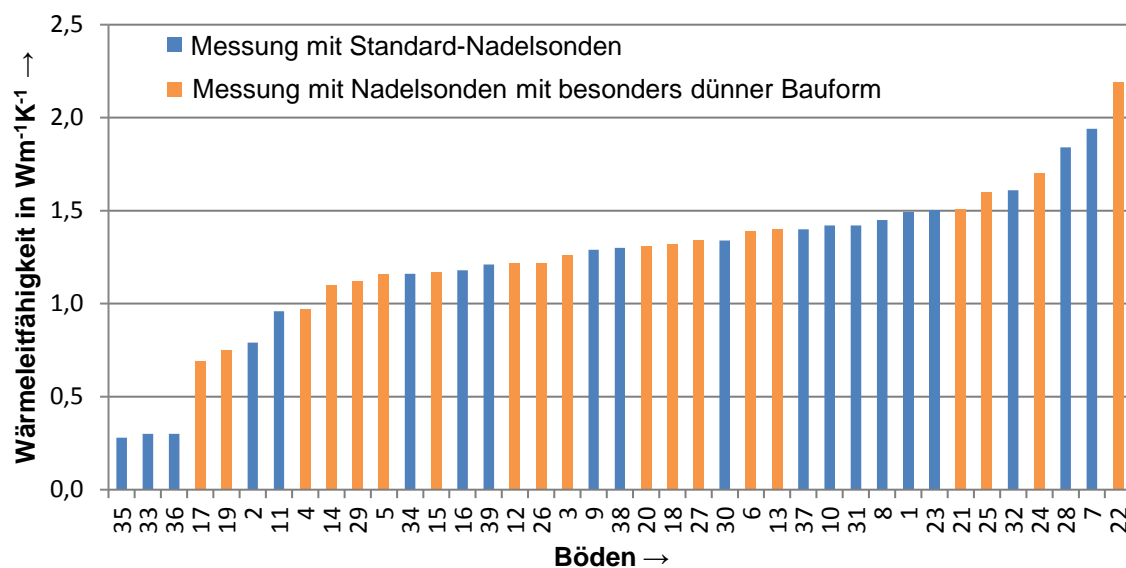


Abbildung 6.22: Übersicht über die Wärmeleitfähigkeiten der Bodenproben bei Entnahmewassergehalt und Entnahmedichte

Die Datengrundlage für die weitere Bewertung bilden die Ergebnisse der Untersuchung von Proben der 20 bayerischen Böden (Nr. 3, 4, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29 und 31 nach Tab. 6.3), an denen im Verdunstungsversuch die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Saugspannung und des Wassergehaltes bestimmt wurden. Es wird davon ausgegangen, dass Moorböden und anmoorige Böden zurzeit aufgrund des hohen Organikanteiles und der damit einhergehenden schlechten Verdichtbarkeit, schlechten Befahrbarkeit, etc. selten für den Trassenbau verwendet werden, beziehungsweise aufgrund der zumeist nur oberflächennah vorhandenen Organikauflage eine Durchmischung mit anderen Böden im Trassenbau stattfindet, weswegen sie nicht aufgenommen wurden. In Abbildung 6.23 ist die Verteilung der entstehenden Wärmeleitfähigkeiten bei einem maximalen Entzug von Wasser bei Saugspannungen von $pF = 4,2$ dargestellt. Diese Saugspannung kann aufgrund Durchwurzelung durch Bäume bzw. schlechte Wassernachlieferung durch Überdeckung oder hohen Grundwasserflurabständen und Kombinationen hieraus auftreten. Über eine Standortbewertung kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens abgeschätzt werden.

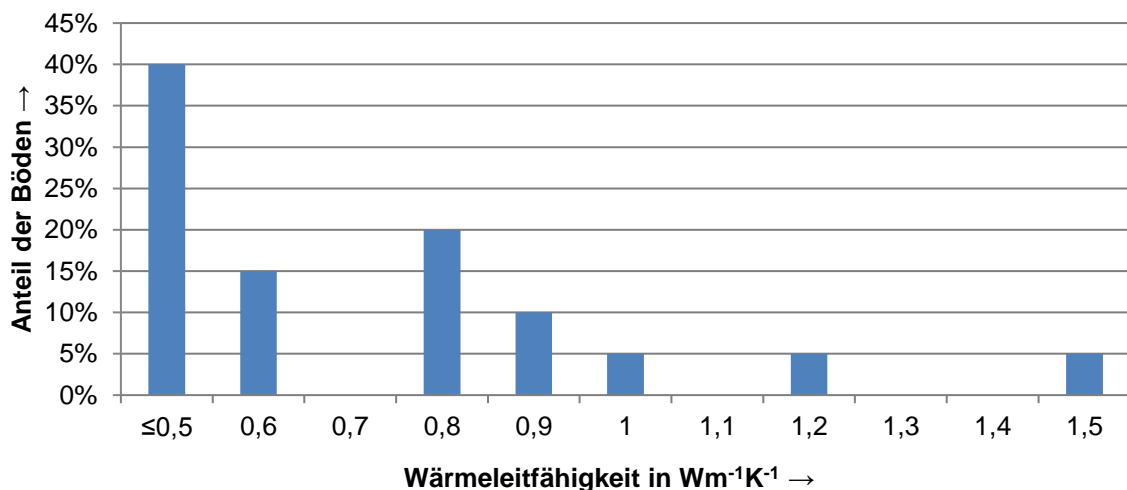


Abbildung 6.23: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten unverdichteter bayerischer Böden in 60 cm Tiefe bei Saugspannungen von $pF = 4,2$

Bei Verdichtung des Bodens um 6 %, was als durchschnittliche Verdichtbarkeit der Bodenproben im Proctorversuch ermittelt wurde, erhöhen sich die Wärmeleitfähigkeiten nach Abbildung 6.23 auf die in Abbildung 6.24 gezeigten Werte. Die vorliegende Dichte des Bodens kann mittels Untersuchung von Stechzylinderproben, die entlang der Trasse entnommen werden, bestimmt werden.

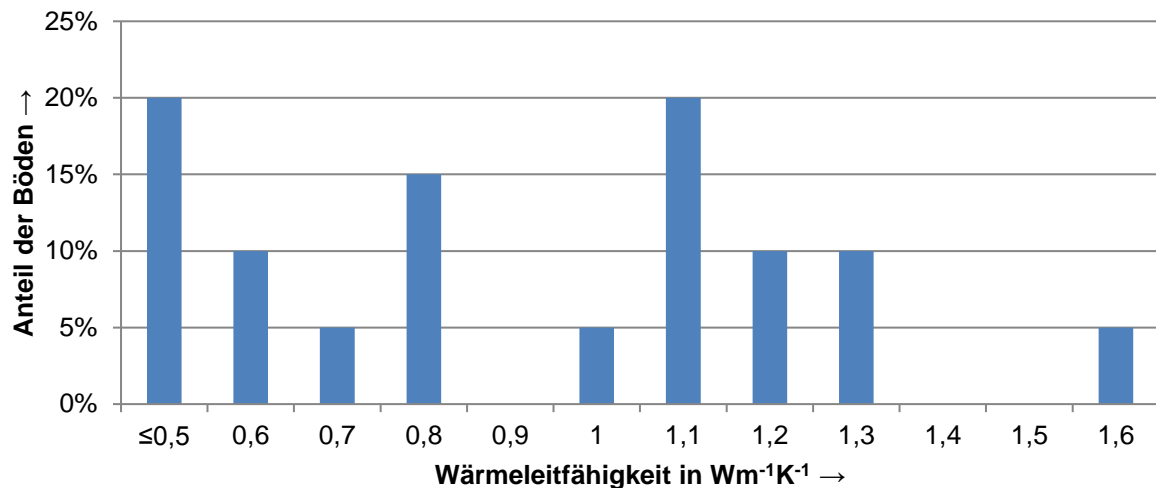


Abbildung 6.24: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten verdichteter bayerischer Böden in 60 cm Tiefe bei Saugspannungen von pF 4,2

Wenn Durchwurzelung vermieden wird, eine Wassernachlieferung in dem von der Kabelerwärmung betroffenen Bodenbereich gegeben ist und eine Verdichtung des Bodens durchgeführt wurde, ergeben sich die Wärmeleitfähigkeiten nach Abbildung 6.25. Dabei ist in Blau die Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten verdichteter Böden in 60 cm Tiefe bei natürlich auftretenden Maximalwerten von Saugspannungen (ohne maximalen Wasserentzug des Bodens aufgrund Durchwurzelung durch Bäume und hohe Versiegelung der Oberflächen mit großen Grundwasser-Flurabständen) dargestellt. In Rot sind die Werte bei Feldkapazität des Bodens dargestellt. Die real auftretenden Wärmeleitfähigkeiten liegen zwischen den blauen und den roten Balken.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass sowohl in gut als auch in schlecht verdichteten Böden aufgrund schlechter Wasserlieferung oder Wasserentzug durch Bäume das Auftreten von Wärmeleitfähigkeiten unter $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (Abbildung 6.23 und 6.24) möglich ist. Eine Erhöhung der Bodenwärmeleitfähigkeiten durch den Anteil einer scheinbaren Wärmeleitfähigkeit aufgrund von Wasserdampftransport ergibt sich bei geringen Wassergehalten kaum (de Vries, 1969; Campbell, 1994).

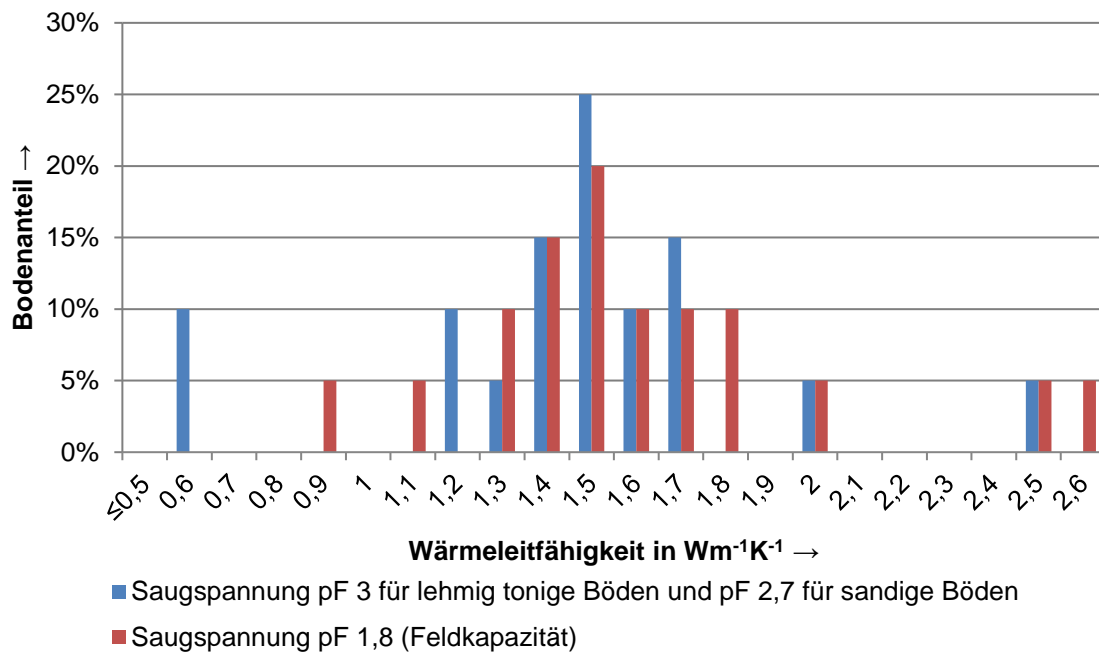


Abbildung 6.25: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten verdichteter Böden in 60 cm Tiefe

Aber auch mit Kenntnis der Umgebungsbedingungen besteht ohne punktuelle Bewertung und Interpolation der Wärmeleitfähigkeit die Möglichkeit, dass Bodenwärmeleitfähigkeiten unter $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ auftreten. 14 % der untersuchten Böden weisen Wärmeleitfähigkeiten auf, die unter $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ liegen. Für diese Böden ist der bei Bemessungen der Übertragungsleistung nach DIN 0276-1000 oft angesetzte Bemessungswert von $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ zu optimistisch gewählt.

Bei verdichteter Ausführung der Kabeltrassen und/oder entsprechender nachträglicher Bewertung kann nach Abbildung 6.25 davon ausgegangen werden, dass mindestens 50 % der Böden um Erdkabel Wärmeleitfähigkeiten größer $1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ aufweisen, was spezifischen Wärmewiderständen kleiner $0,7 \text{ KmW}^{-1}$ entspricht. Damit kann für Kabel in diesen Böden eine erhöhte Belastbarkeit nach DIN 0276-1000 (Abschnitt 3.1.2) für die Stromverteilung angewendet werden.

In diese Messwerte sind keine Veränderungen bzw. Verbesserungen der Wärmeleitfähigkeit durch Steine eingerechnet. Ebenso kann eine zusätzliche Erwärmung des Bodens zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führen (Abschnitt 3.3.2).

7 ÜBERPRÜFUNG VON MESSWERTEN IM KABELBETRIEB

7.1 Erdkabeltestfeld

Zur Validierung der Labormessungen an teilgesättigten Lockergesteinen wurden Freilandversuche durchgeführt. Dabei wurden die in-situ Wärmeleitfähigkeiten aus Aufheizkurven bei vorgegebenen Stromlasten rückgerechnet und den Laborwerten zugeordnet.

An der TU Darmstadt wurde ein Erdkabeltestfeld (Stegner et al., 2013) mit 14 m Länge und 6 m Breite, das in vier Abschnitte mit jeweils 3,5 m Länge aufgeteilt ist, errichtet (Abb. 7.1). Es wurden verschiedene Kabelanordnungen aus Mittel- und Niederspannungskabeln in 0,6 bis 0,8 m Tiefe nach DIN 0276-1000 verlegt. Die einzelnen Kassetten des Testfeldes sind hydraulisch und thermisch mittels Kunststoff-Noppenbahnen und Styroporplatten entkoppelt. Im ersten und vierten Abschnitt wurde vor dem Einbau der Kabel der natürlich anstehende Boden bis auf eine Tiefe von 2,5 m über die gesamte Breite gegen tonige und lehmige Böden ausgetauscht. In der zweiten Kasette sind die Kabel in den natürlich anstehenden Sand eingebracht und im dritten Feld in einen Bettungsbaustoff (Flüssigboden) gehüllt.

Regelbare Hochstromtransformatoren liefern die elektrische Leistung für die Bestromung der Kabel. Mit den Transformatoren kann der gleichzeitige Betrieb von bis zu vier Mittelspannungskabelbündeln oder bis zu vier Niederspannungskabeln im Einzel- oder Mischbetrieb simuliert werden. Die Einzelanordnungen von Mittel- und Niederspannungskabeln (Abb. 7.1, I und IV) ermöglicht die Untersuchung der thermischen und hydraulischen Beeinflussung des umliegenden Bodens um einzelne Kabel. Die Veränderungen der thermischen und hydraulischen Bedingungen im Testfeld werden durch verschiedene Sensoren erfasst. Acht Tensiometer dienen der Bestimmung der Kapillarspannungen, 20 Frequency-Domain-Reflectometry-Sensoren der Bestimmung der Wassergehalte und 80 Pt100-Widerstandsthermometer, die am Leiter, am Mantel, sowie in der Umgebung der Kabel angebracht werden, dienen der punktuellen Temperaturerfassung. Diese punktuellen Messungen dienen in Zukunft der Kalibrierung der flächenhaften Temperaturmessung nach der Methode des Distributed-Temperature-Sensing (DTS) mittels Lichtwellenleitern, die in Schleifen im Testfeld eingebaut sind. Die Auswertung der räumlichen Temperaturverteilung wird in den nachfolgenden Arbeiten auf dem Testfeld vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Konzentration auf die Leitertemperaturen der Kabeleinzelanordnungen.

In Abbildung 7.2 und Abbildung 7.3 sind die Bauabschnitte beim Einbringen der Temperatursensoren unterhalb der Kabelebene, der Einbau einer Bodenschicht und der normgerechte Einbau der Kabel in 60 cm Tiefe vor und nach dem Einbau des Flüssigbodens und vor dem vollständigen Verfüllen dargestellt. Die Abbildung 7.4 zeigt das fertiggestellte Erdkabeltestfeld im Betrieb.

In Anhang 3 sind die thermischen Kennwerte der Einzelbestandteile der Kabel mit Hilfe von Laborversuchen und Herstellerangaben zusammengestellt, und in Anhang 4 ist eine Bewertung der temperaturbedingten Kabeldehnungen dargestellt. Ausdehnungen der Kabel in Querrichtungen sind demnach gering und können nahezu vernachlässigt werden. Um Verschiebung der Kabel durch eine Längenausdehnung zu verringern, wurde auf eine gute Einspannung der Kabel bei der Verlegung durch homogene Verdichtung des umgebenden Bodens geachtet.

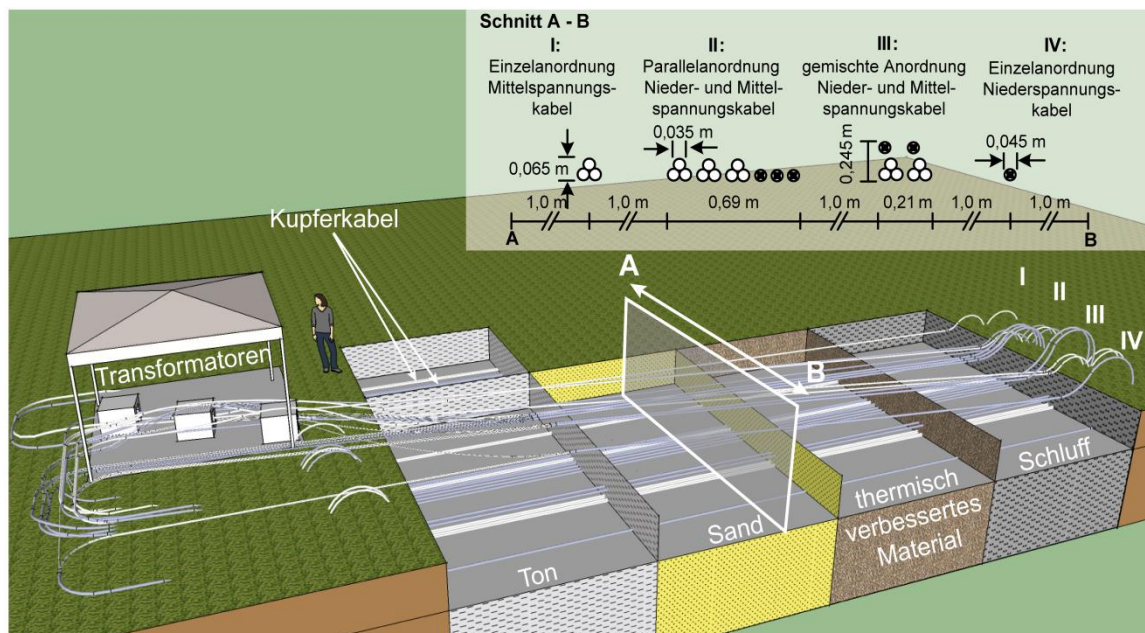


Abbildung 7.1: Ansicht des Erdkabeltestfeldes mit den Bodenkassetten Ton, Sand, thermisch verbessertes Material (Flüssigboden) und Schluff bzw. Lehm



Abbildung 7.2: Einbau von Sensoren und Verdichtung einer Bodenlage (2013)



Abbildung 7.3: Flüssigbodenschalung und ausgehärteter Flüssigboden mit Polystyrolämmung (2013)



Abbildung 7.4: Fertiggestelltes Erdkabeltestfeld im Betrieb (2014)

7.1.1 Hydrogeologische Bedingungen

In der direkten Umgebung des Testfeldes befinden sich zwei Grundwassermessstellen der Hessenwasser GmbH, von der die aufgenommenen Daten dieser Studie zur Verfügung gestellt wurden. Die zugehörigen Zeitreihen sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Das Testfeld befindet sich auf einer Höhe von ca. 110 m über Normalhöhennull. Der minimale Grundwasserabstand von der Oberfläche beträgt damit ca. 14 m. Hierdurch ist eine kapillare Anbindung des Grundwassers an die Kabelebene nicht gegeben.

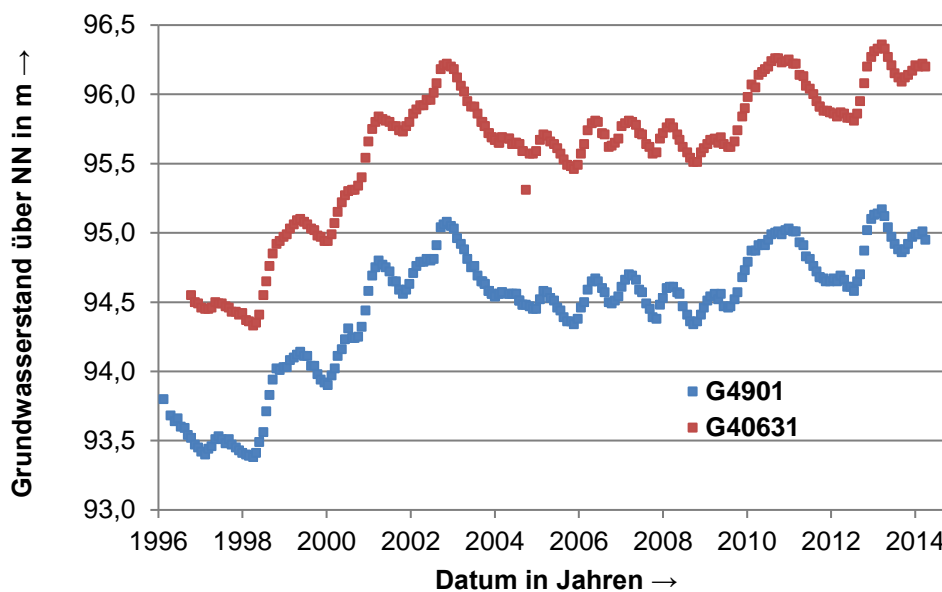


Abbildung 7.5: Zeitreihen der Grundwasserstände in der direkten Umgebung des Erdkabeltestfeldes (Daten der Messstellen G4901 und G40631 der Hessenwasser GmbH)

Die kapillaren Steighöhen verschiedener Bodenarten sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Der am Testfeld anstehende mittelnkörnige Sand erreicht demnach auch bei darunter ggfs. anstehenden Feinsandbereichen maximale Steighöhen von einem Meter. Die im Testfeld befindliche Wassermenge wird somit aus dem meteorologischen Wasser gespeist. Die im Testfeld eingebauten Bodenkassetten aus tonigen und lehmig/schluffigen Böden sowie der Flüssigboden (Abschnitt 7.1.2) erreichen deutlich größere kapillare Steighöhen, unterhalb der Bodenkassetten kommt es aber innerhalb des natürlich anstehenden Sandes zu einem Abreißen der kapillaren Anbindung an das Grundwasser.

Tabelle 7.1: Kapillare Steighöhen in verschiedenen Bodenarten (Wolkersdorfer, 2008)

Bodenart	Korndurchmesser in mm	Kapillare Steighöhe in mm
Kies	> 2	< 20
Grobsand	2,0 - 0,6	50 - 150
Mittelsand	0,6 - 0,2	100 - 300
Feinsand	0,2 - 0,06	150 - 1.000
Schluff	0,06 - 0,002	1.000 - 10.000
Ton	< 0,002	> 10.000

7.1.2 Messwerte der Testfeldböden

Die Kabel wurden in drei natürliche sowie einen künstlichen Boden gebettet. Letzterer wird als Flüssigboden bezeichnet. Der Baustoff wird eingesetzt, wenn keine Verdichtungsarbeit angewendet und trotzdem eine volumenstabile Verfüllung erreicht werden soll. Bei diesen Spezialbaustoffen, die für den Rohrleitungsbau entwickelt wurden, ist ein wichtiges Kriterium, dass sie auch noch nach Jahren mit dem Spaten lösbar sind, um kostengünstige Reparatur- und Anbindungsarbeiten zu ermöglichen (Stolzenburg, 2004). Die Kennwerte der Böden sind in Abbildung 7.6 bis Abbildung 7.7 und Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3 dargestellt.

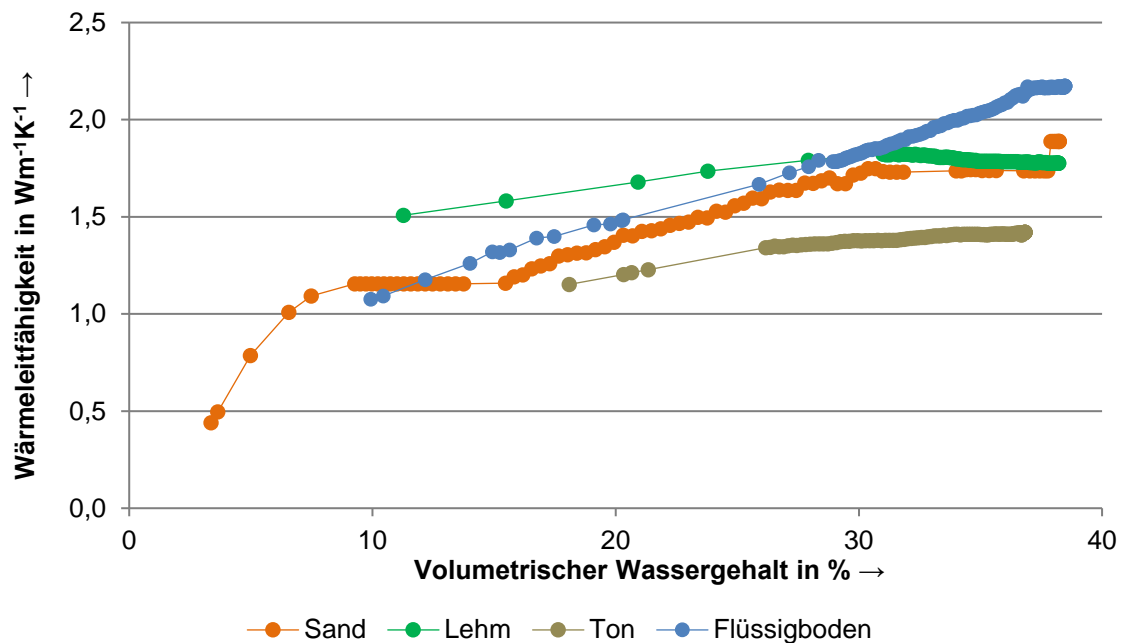


Abbildung 7.6: Wärmeleitfähigkeiten der in den Testfeldkassetten eingebauten Böden in Abhängigkeit des Wassergehaltes

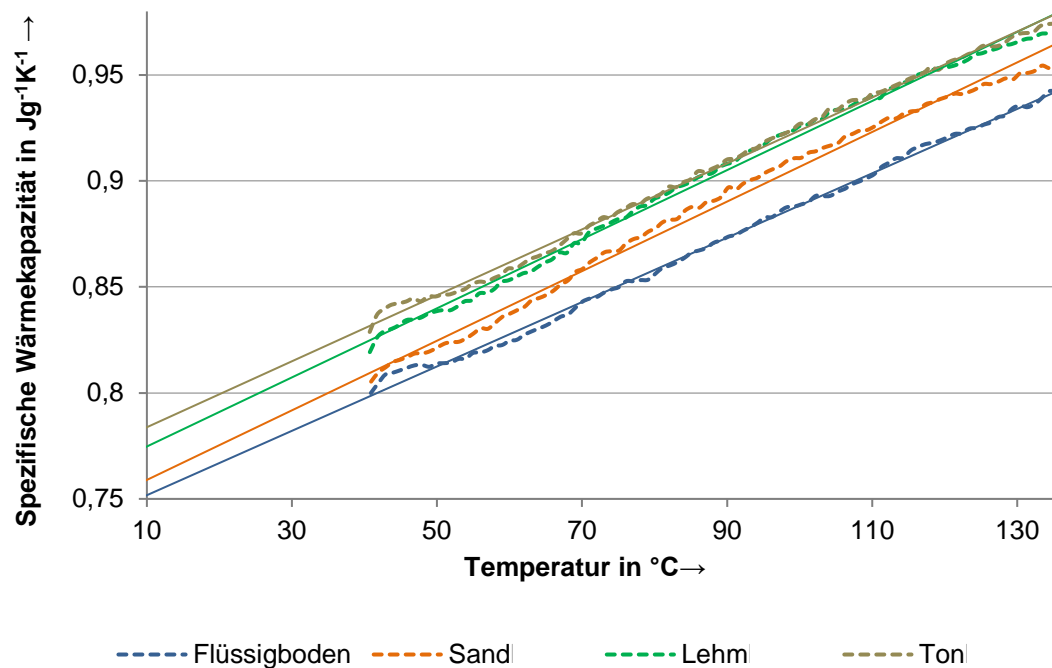


Abbildung 7.7: Wärmekapazität der in den Testfeldkassetten eingebauten Böden im ofengetrockneten Zustand

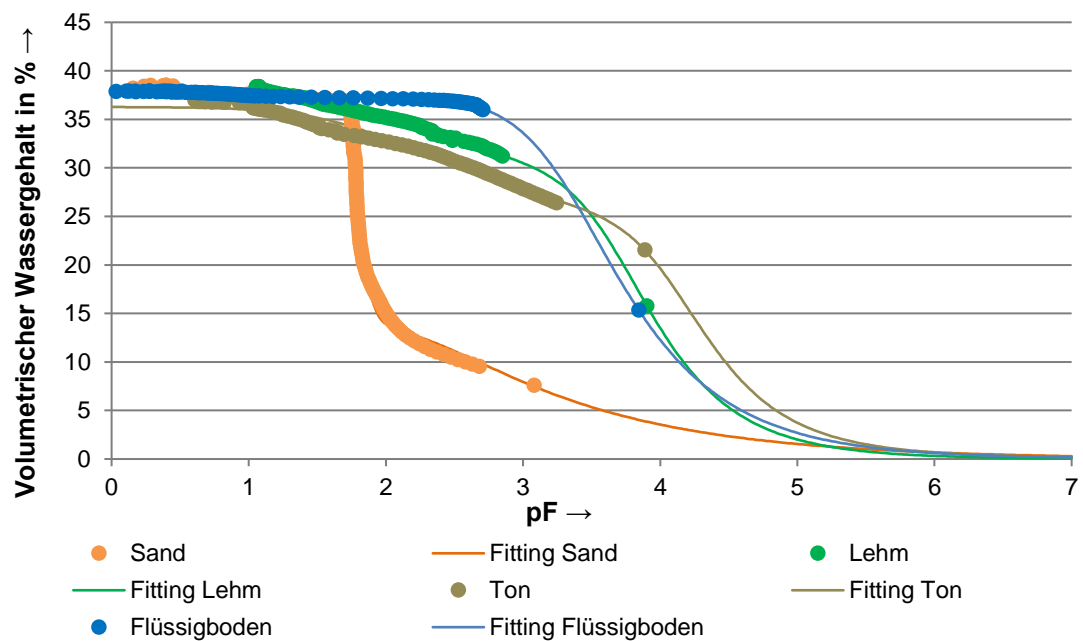


Abbildung 7.8: Wassergehalt der Testfeldböden in Abhängigkeit des pF-Wertes

Tabelle 7.2: Bodenkennwerte des in den Testfeldkassetten eingebauten Tones und Lehms

Bodenart	Kürzel nach DIN EN14688	Korndichte in gcm ⁻³	Fließgrenze in %	Ausrollgrenze in %	Plastizitätszahl in %	Glühverlust in %
Ton	U, t, fs'	2,75	33.7	21.4	12.3	2,5
Lehm	U, t', fs'	2,67	23.3	21.8	1.5	1,9

Tabelle 7.3: Bodenkennwerte des in den Testfeldkassetten eingebauten Sandes

Bodenart	Kürzel nach DIN EN 14688	Korndichte in gcm ⁻³	Lockerste Lagerung in gcm ⁻³	Dichteste Lagerung in gcm ⁻³	Glühverlust in %
Sand	fS, ms*	2,66	1,23	1,65	1,1

Während des Einbaus des Bodens wurden in regelmäßigen Abständen in unterschiedlichen Tiefen Ausstechzylinder der bindigen Böden, Ton und Lehm entnommen, da bei diesen über die Fläche die Möglichkeit größerer Inhomogenität in den Einbaukennwerten als beim Sand vermutet wurden. Die Auswertung der Dichte der Stechzylinderproben (Tabelle 7.4) zeigen aber nur geringe Abweichungen zwischen Minimal- und Maximalwerten.

Tabelle 7.4: Homogenität von Ton und Lehm

Bodenart	Feuchtdichte in kgm ⁻³		Trockendichte in kgm ⁻³		Porenanteil in %		Wassergehalt in %	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Ton	1,98	2,00	1,65	1,68	37	38	19	20
Lehm	2,02	2,08	1,51	1,57	43	45	18	20

7.1.3 Validierung der Testfeldbedingungen

Die realen Bedingungen werden auf dem Testfeld mit Abweichungen abgebildet. Diese sind:

- Bestromung der Kabel mit niedrigeren Spannungen als im realen Betrieb,
- Beschränkung der Kabellänge in den einzelnen Bodenfeldern,
- Rückführung der Kabel an der Oberfläche,
- Betrieb der Kabel mit offenen Schirmen, wodurch keine Mantelverluste entstehen.

Die Unterschiede zwischen realen Mantelverlusten und den Testfeldbedingungen im hier betrachteten 150 mm² Mittelspannungskabel liegen unterhalb von 3 % der Gesamtverluste

und können deswegen ebenso wie beim Mittelspannungskabel, wo kein Mantel bzw. Schirm vorhanden ist, vernachlässigt werden (Abschnitt 2.3).

Der elektrotechnische Aufbau für die Bestromung ist in Abbildung 7.9 dargestellt. Die Beschränkungen in der Kabellänge werden dadurch aufgehoben, dass nur Messwerte für die Leitertemperaturen verwendet werden, die in der Feldmitte gewonnen wurden. Die Rückführung der Kabel an der Oberfläche führt zu veränderten Kabeltemperaturen, da die Kabel an der Oberfläche gegenüber den im Boden verlegten Kabeln durch die Luft konvektiv gekühlt werden. In der Regel sind die Temperaturen der Kabel im Boden deswegen höher. Unterschiedliche Temperaturen führen zu unterschiedlichen elektrischen Widerständen und damit zu veränderten Verlusten. Bei der Auswertung der Leitertemperaturen nach der Linienquellentheorie werden deswegen die Heizleistungen bzw. Kabelverluste abschnittsweise anhand der temperaturabhängigen Widerstände berechnet.

Auf dem Erdkabeltestfeld werden die Niederspannungskabel (Abbildung 7.9) über alle vier Leiter bestromt. Im Netz wird der PEN-Leiter jedoch nur bei asymmetrischen Lastfällen benötigt. Der PEN-Leiter wurde u. a. kurzgeschlossen, weil hierdurch der bauliche Aufwand im Testfeld erheblich reduziert werden konnte. Alternativ hätte eine zusätzliche oberirdische Rückführung des Leiters erfolgen müssen um den Stromkreis zu schließen, was zu zusätzlichen induktiven Kopplungen geführt hätte. Deswegen muss ein Strom, wie er im Netz auftritt, im Kabeltestfeld über einen Umrechnungsfaktor nachgebildet werden. Da hier prinzipiell die Strombelastbarkeit untersucht wird und diese vor allem durch eine thermische Grenze festgelegt ist, wird im Testfeld ein Strom I_{Testfeld} gewählt, der die gleiche maximale Leitertemperatur $\vartheta_{\text{Leiter,max}}$ erzeugt wie ein vergleichbarer Strom im Netz I_{Netz} . Hierzu wurde das Niederspannungskabel in der FEM-Simulationssoftware COMSOL Multiphysics nachgebildet. Anschließend wurde eine gekoppelt thermisch-elektrische Berechnung durchgeführt (Janssen, 2014).

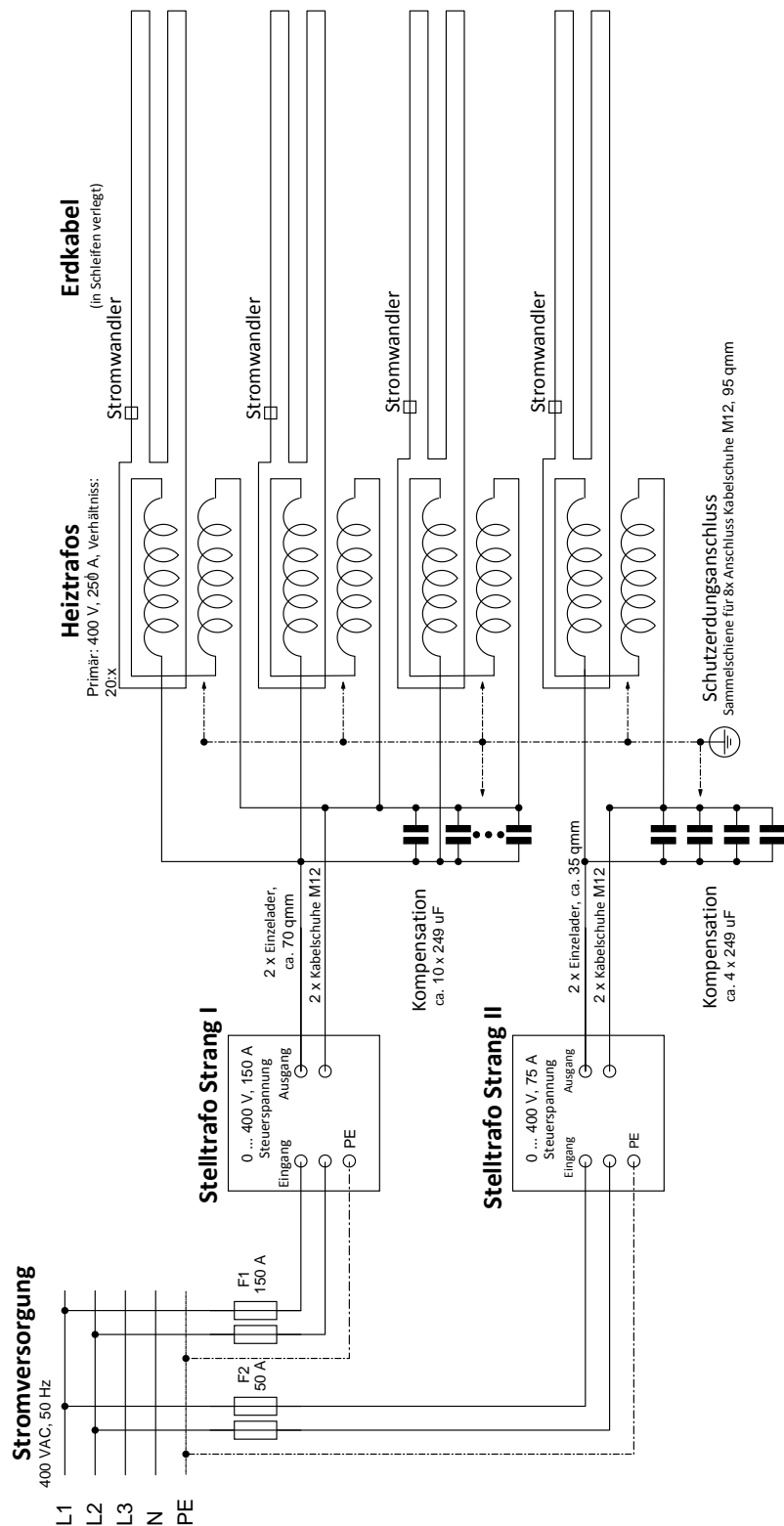


Abbildung 7.9: Elektrotechnischer Aufbau des Erdkabeltestfeldes

Durch jede Phase des Niederspannungskabels fließt nach Abbildung 7.9 der gleiche Strom. In Abbildung 7.10 sind qualitativ die sich einstellenden Temperaturen dargestellt, für die Fälle, das vier nebeneinanderliegende Leiter und drei nebeneinanderliegende Leiter

gleich bestromt werden. Die Temperaturfarbskala ist für beide Anordnungen gleichgehalten, so dass sich durch die dunklere Färbung direkt zeigt, dass eine vierphasige Bestromung bei gleicher Stromstärke zu einer höheren maximalen Leitertemperatur $\vartheta_{\text{Leiter,max}}$ führt.

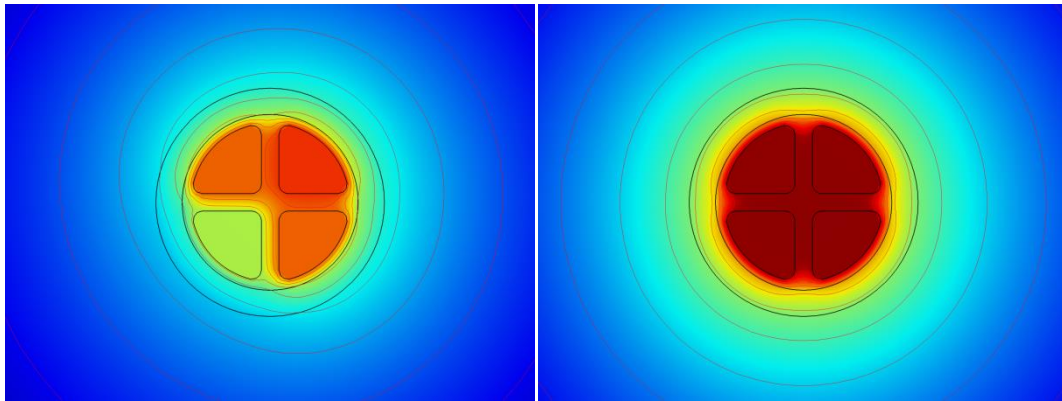


Abbildung 7.10: Thermisches Abbild eines Niederspannungskabels bei dreiphasiger (links) und vierphasiger (rechts) Bestromung mit jeweils 250 A (Janssen, 2014)

Aus diesem Grund wurde eine Kennlinie der sich einstellenden maximalen Leitertemperaturen $\vartheta_{\text{Leiter,max}}(I)$ in Abhängigkeit des Stromes für die verschiedenen Bestromungsarten erstellt. In Abbildung 7.11 sind im oberen Bereich die maximalen Leitertemperaturen $\vartheta_{\text{Leiter,max}}(I)$ für die beiden Bestromungsarten dargestellt. Die roten Pfeile deuten an, auf welche Weise nun ein Konversionsfaktor k bestimmt werden kann. Ausgehend davon kann bei er Bestromung die Stromstärke angepasst und eine gleiche maximale Leitertemperatur $\vartheta_{\text{Leiter,max}}$ erzielt werden.

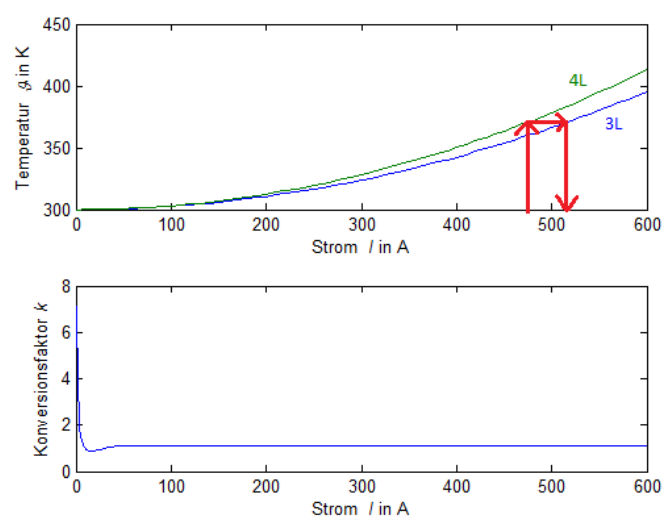


Abbildung 7.11: Temperaturen in Abhängigkeit der Stromlast (oben), Konversionsfaktor zwischen drei- bzw. vierphasiger Bestromung (unten) (Janssen, 2014)

Der Konversionsfaktor k ist im unteren Diagramm von Abbildung 7.11 dargestellt, und es ist zu erkennen, dass er von der Stromstärke unabhängig ist und als konstant angesehen werden kann. Der genaue Wert liegt bei $k = 1,0875$. Die Umrechnung der Stromstärke im Testfeld gegenüber der der entsprechenden Stromstärke im Netz erfolgt damit durch Gleichung (7.1).

$$I_{\text{Testfeld}} = k \cdot I_{\text{Netz}} \Leftrightarrow I_{\text{Testfeld}} = I_{\text{Netz}} / k \quad (7.1)$$

Die Simulationsergebnisse in Janssen (2014) zeigen, dass eine durch den Konversionsfaktor angepasste Stromstärke zu einer gleichen maximalen Leitertemperatur führt.

7.2 Bestimmung von Bodenkennwerten aus Kabelaufheizungen

Aus den auf dem Erdkabeltestfeld gemessenen Zeitreihen sollen nun die thermischen Eigenschaften des Bettungsmaterials ermittelt und diese mit den im Labor gemessenen Kennwerten verglichen werden. Dies wird mit der Software Geologik TRT, die üblicherweise in der Geothermie in der Auswertung von Geothermal Response Tests angewendet wird durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeiten werden ebenso wie die Wassergehalte und Saugspannungen in-situ bestimmt. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit den im Labor ermittelten Werten.

Für die Rückrechnung der Bodenkennwerte mittels der Linienquellentheorie wird ein Beobachtungsradius festgelegt. Bei dem Niederspannungskabel wird der tatsächliche Kabelradius des Kabels von 2,3 cm verwendet. Für das Dreierbündel aus Mittelspannungskabeln wird ein Ersatzradius entsprechend Gleichung (7.2) verwendet. Es ergibt sich ein Ersatzradius r_e von 3,9 cm bei einem Kabelradius r_k von 1,8 cm.

$$r_e = r_k + \left(\frac{r_k}{\cos 30^\circ} \right) \quad (7.2)$$

Für die Rückrechnung der thermischen Bodeneigenschaften aus den Aufheizkurven wird zunächst die eingebrachte Wärmeleistung pro Längeneinheit berechnet. Die Berechnung erfolgt auf Basis der eingebrachten Ströme und dem Widerstand des Kabelleiters, wobei der elektrische Widerstand des Leiters mit der Temperatur steigt. Deswegen werden die eingebrachten thermischen Leistungen für jede Bodenkassette anhand der gemessenen Temperaturen nach Abschnitt 2.3 einzeln berechnet.

In Abbildung 7.12 ist die im Erdkabeltestfeld gemessene Temperaturzeitreihe der ungestörten Bodentemperatur über ein Jahr in der Verlegetiefe der Mittel- und Niederspannungskabel von 70 cm dargestellt. Tageszeitliche Temperaturschwankungen sind in dieser Tiefe kaum erkennbar. Auch sind nur geringe Abweichungen von weniger als 2 °C in der

Kabelumgebung aufgrund von kurzzeitlichen Temperaturschwankungen oder Regenereignissen nachweisbar. Die Dämpfung der tageszeitlichen Temperaturschwankungen sowie die Phasenverschiebung der Temperaturzeitreihe zur Oberflächentemperatur korrelieren in der zeitlichen Lage der Kurve mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen (Geiger, 1961; VDEW, 1991). Der Einfluss der Umgebungstemperatur ist deswegen bereits in die Normierung der Kabelbelastbarkeit eingegangen. Im Hinblick auf veränderte Kabelbelastung durch die Einspeisung von Strom aus Sonnenenergie zeigt die Temperaturzeitreihe keine direkten Temperaturreserve der Kabelumgebung, da in der Regel die größte Einspeisung in den Sommermonaten stattfindet, in denen auch die höchsten ungestörten Bodentemperaturen vorgefunden werden (Balzer et al., 2015).

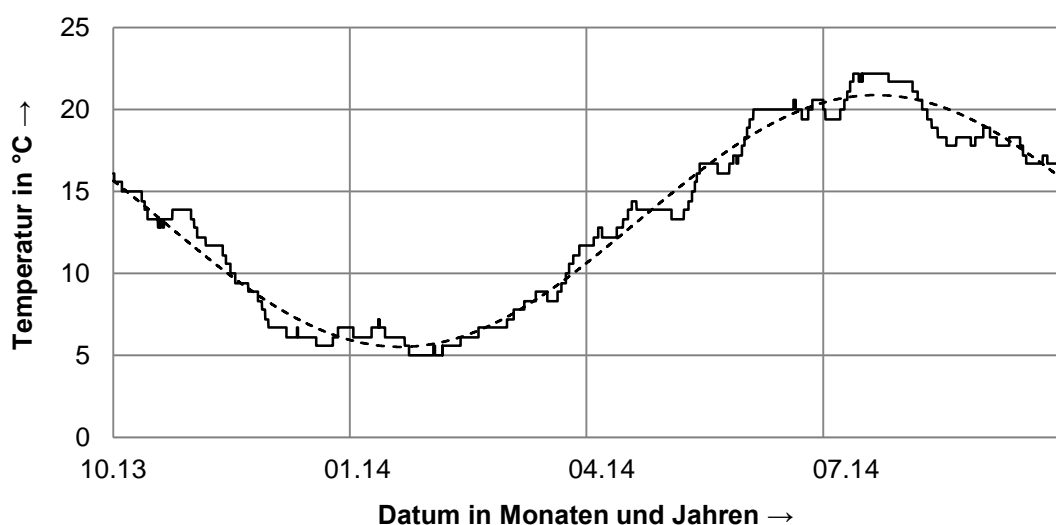


Abbildung 7.12: Bodentemperaturen in 70 cm Tiefe im Sandfeld auf dem Erdkabeltestfeld über ein Jahr (Balzer et al., 2015)

7.2.1 Versuchsreihen an Mittel- und Niederspannungskabeln

Die im Folgenden vorgestellte Versuchsreihe fand im Zeitraum vom 30.06.2014 bis 10.09.2014 statt. Die Versuche wurden unter Aufrechterhaltung einer stabilen Leistungszufuhr und unter Verdichtung der Messintervalle zum Beginn der Aufheizphasen durchgeführt, was die gewonnenen Messwerte stark gegenüber vorherigen Messungen verbesserte. Zu Beginn wurden Messungen in zweiminütigen Intervallen aufgezeichnet, bis sich eine annähernd stabile Temperatur ausgebildet hatte. Die Messintervalle wurden dann auf 10 min erhöht (Schubert, 2014).

7.2.1.1 Mittelspannungskabel

Die Bestromung des Mittelspannungskabels startete am 18.07.2014 und dauerte 600 Stunden. Dabei wurde in 5 Laststufen von 100 A, 200 A, 300 A und 400 A mit einer anschließenden Reduktion auf 340 A bestromt. Diese Stromstärke wurde dann ca. 30 h gehalten

worauf sie auf 320 A reduziert wurde. Die Ergebnisse der Temperaturmessung am Leiter sind in Tabelle 7.5 und Abbildung 7.14 dargestellt. Am 07.08 um 15 Uhr (nach 479 h Bestromung) kam es zu einem Einbruch der Stromlast aufgrund eines wenige Minuten dauernden Stromausfalls, dieser ist durch einen Peak nach unten zu erkennen.

Tabelle 7.5: Messdaten der Aufheizungen des Mittelspannungskabelbündels

Stromstärke in A	Dauer in h	Maximaltemperatur am Leiter in °C				Ungestörte Bodentemperatur in °C
		Sand	Lehm	Ton	Flüssigboden	
100	84	28,30	26,01	29,11	26,27	20,37
200	79	36,32	34,53	41,02	34,45	20,91
300	338	58,27	55,57	74,43	54,40	21,27
340	31	66,98	63,62	89,16	62,14	21,43
320	68	65,69	61,96	87,30	60,80	21,49

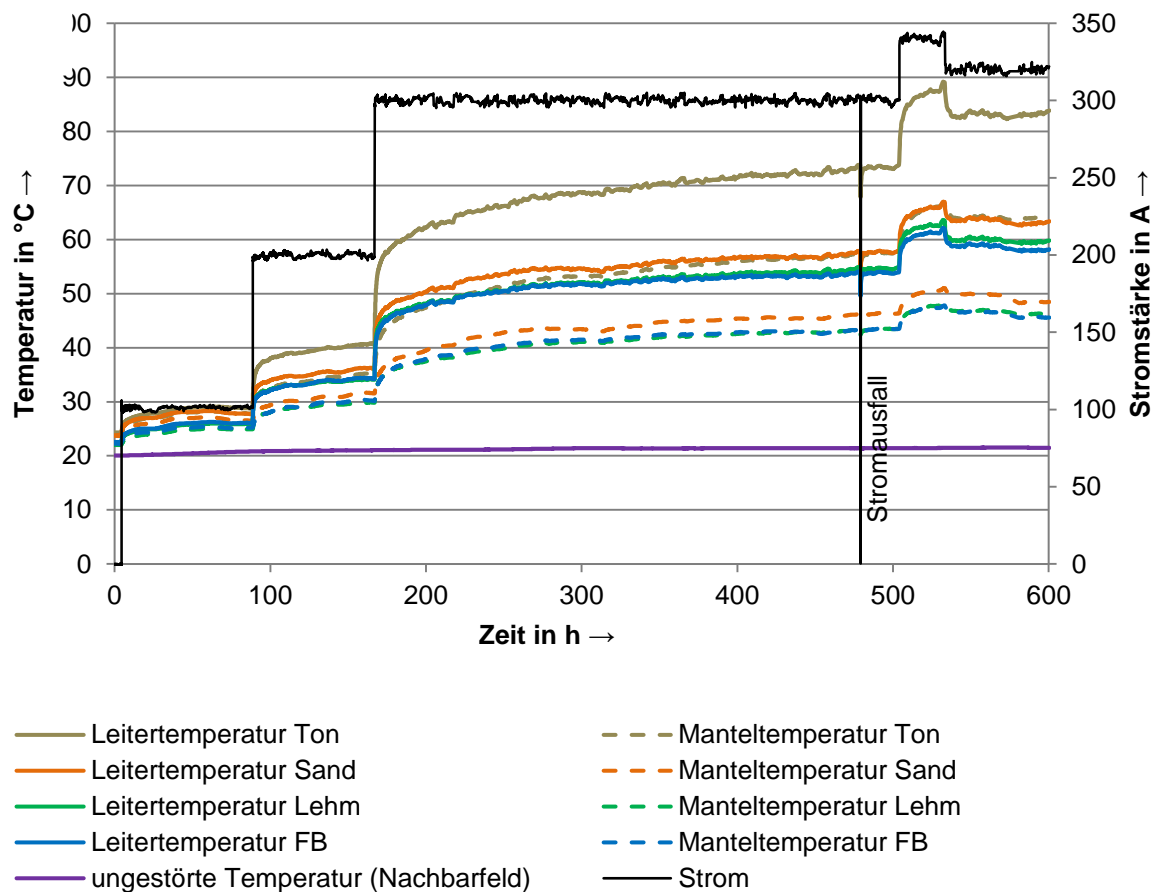


Abbildung 7.13: Aufheizkurven Versuchsreihe am Mittelspannungskabel (Dreierbündel) im Grabenverbau

Aus diesen Messwerten wurden die in Tabelle 7.6 und Tabelle 7.7 dargestellten Bodenkennwerte ermittelt. Dabei war festzustellen, dass die erste Stromstufe von 100 A noch keine korrekt auswertbaren Ergebnisse lieferte, weil die Mindestleistung zum Erreichen einer stabilen Temperatur nicht gegeben war. Das Kabel kühlte nach einer Aufheizphase aufgrund der Umgebungstemperaturen wieder ab.

Tabelle 7.6: Anhand von Aufheizkurven des Mittelspannungskabelbündels berechnete Bodenkennwerte

Stromstärke in A	Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$			
	Sand	Lehm	Ton	Flüssigboden
200	1,7	1,8	1,3	2,1
300	1,8	1,8	1,3	2,1
340	1,8	1,8	1,3	2,1

Tabelle 7.7: Anhand von Aufheizkurven des Mittelspannungskabelbündels berechnete Bodenkennwerte

Stromstärke in A	Volumetrische Wärmekapazität in $\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$			
	Sand	Lehm	Ton	Flüssigboden
200	2,5	2,4	2,4	2,5
300	2,5	2,4	2,4	2,5
340	2,5	2,4	2,4	2,5

7.2.1.2 Niederspannungskabel

Die Versuchsreihe zur Bestromung des Niederspannungskabels begann am 22.08.2014 statt und dauerte 285 Stunden an (Abbildung 7.14). Es wurde in drei Stromstufen mit 100 A, 200 A und 300 A bestromt (Tabelle 7.8). Die aus den Aufheizkurven ermittelten Bodenkennwerte sind in Tab. 7.9 und Tab. 7.10 dargestellt.

Tabelle 7.8: Messdaten der Aufheizungen des Niederspannungskabels

Stromstärke in A	Dauer in h	Maximaltemperatur am Leiter in $^{\circ}\text{C}$				Ungestörte Bodentemperatur in $^{\circ}\text{C}$
		Sand	Lehm	Ton	Flüssigboden	
200	79	35,69	35,27	43,93	35,34	14,30
300	338	64,00	60,65	85,38	62,85	16,95

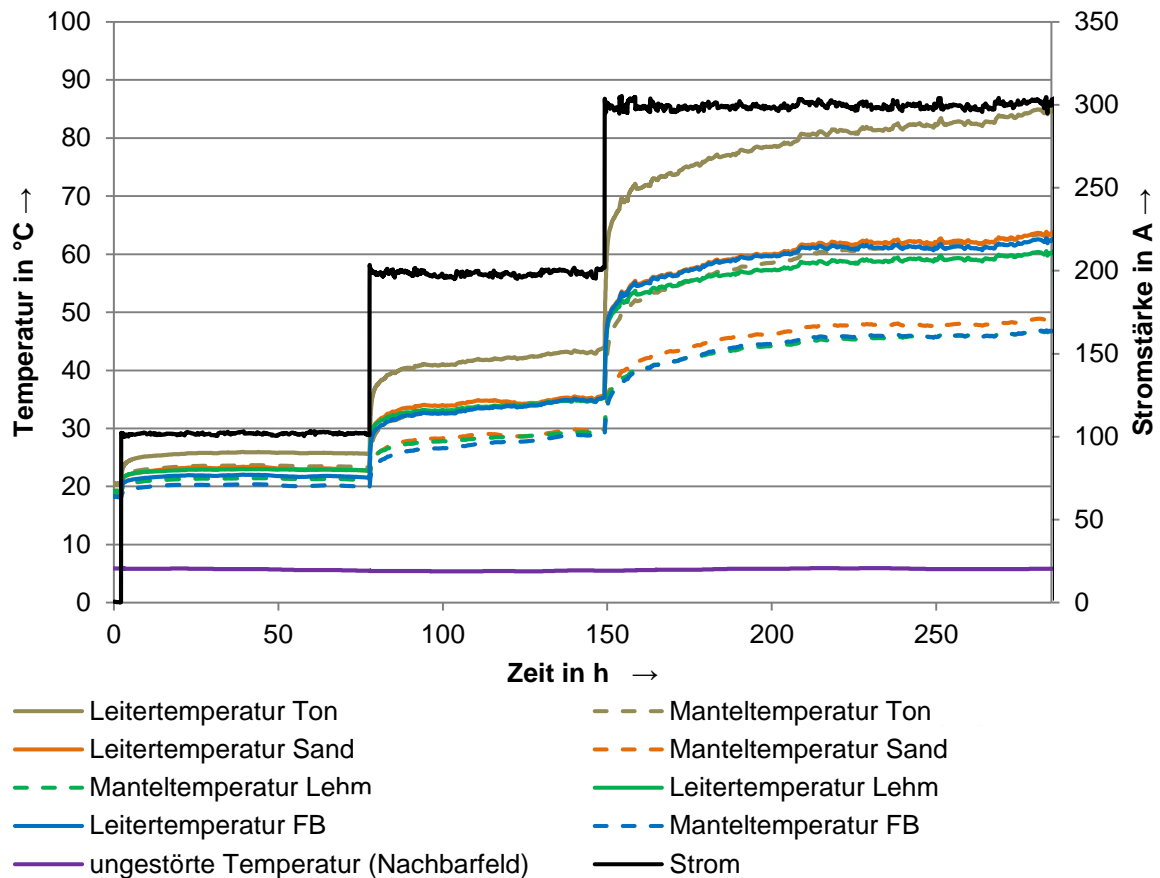


Abbildung 7.14: Aufheizkurven der zweiten Versuchsreihe am Niederspannungskabel

Tabelle 7.9: Anhand von Aufheizkurven der Niederspannungskabel berechnete Bodenkennwerte

Stromstärke in A	Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$			
	Sand	Lehm	Ton	Flüssigboden
100	1,7	1,2	1	2,1
200	1,7	1,8	1,3	2
300	1,7	1,8	1,3	1,9

Tabelle 7.10: Anhand von Aufheizkurven der Niederspannungskabel berechnete Bodenkennwerte

Stromstärke in A	Volumetrische Wärmekapazität in $\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$			
	Sand	Lehm	Ton	Flüssigboden
100	2,5	2,4	2,4	2,5
200	2,5	2,4	2,4	2,5
300	2,5	2,4	2,4	2,5

7.2.2 Vergleich von Labor- und Feldmesswerten

Die auf Basis der Aufheizkurven der Kabel im Feld ermittelten Bodenwärmeleitfähigkeiten werden im Folgenden mit den im Labor gemessenen Werten verglichen. Die Wassergehalte schwankten während der Felduntersuchungen zwischen 30 und 40 % in allen Böden. Die Wärmeleitfähigkeit variiert in diesem Bereich lediglich beim Flüssigboden stark (Tabelle 7.11). Die Wärmeleitfähigkeiten aus den Labormesswerten wurden den entsprechenden Feldmesswerten über die zugehörigen Wassergehalte zugeordnet. Die im Feld ermittelten Wärmeleitfähigkeiten zeigen bei den natürlichen Böden gute Übereinstimmungen mit den Laborwerten. Die Abweichungen lassen sich u. a. mit den Umgebungsbedingungen erklären. Die mit Geologik TRT v1.3 ermittelten Werte wurden aus in-situ Messungen gewonnen und beinhalten alle Umwelteinflüsse, die in der Realität auf Kabeltrassen wirken, wie z. B. Verringerung von Kontaktwiderständen mit der Temperaturdehnung des Kabels und erhöhter Dampftransport im Boden mit steigender Temperatur.

Tabelle 7.11: Vergleich von Labor- und Feldmesswerten der Wärmeleitfähigkeiten

Versuchstyp und Abweichungen	Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$			
	Sand	Lehm	Ton	Flüssigboden
Messwerte im Laborversuch	1,5 bis 1,7	1,8	1,3 bis 1,4	1,8 bis 2,2
Mittelspannungskabelbündel				
Mittlerer Messwert der Feldversuche	1,7	1,9	1,3	2,3
Abweichungen zwischen Labor und Feld in %	+ 3 bis 16	+ 7	- 5 bis + 3	+ 5 bis + 28
Niederspannungskabel				
Mittlerer Messwert der Feldversuche	1,7	1,8	1,3	2,1
Abweichungen zwischen Labor und Feld in %	+ 2 bis 15	0	0 bis + 8	- 15 bis + 4,8

Beim Flüssigboden zeigen sich entsprechend der größeren Schwankungsbreite der Wärmeleitfähigkeit im untersuchten Bereich auch größere Abweichung bei der Zuordnung von Labor- und Feldmesswerten. Dies kann neben den genannten Einflussfaktoren auch daran liegen, dass die Wassergehalte in der Umgebung des Kabels bereichsweise stärker von der Kabelerwärmung beeinflusst werden, als es von den Wassergehaltssensoren, die in einer festen Entfernung vom Kabel eingebaut sind, aufgezeichnet wurde.

In Zukunft werden diese analytischen Auswertungen um Finite-Elemente-Modellierungen ergänzt, wodurch eine weitere Verbesserung der Qualität der Auswertung zu erwarten ist. Solche Auswerteverfahren stellen eine Möglichkeit dar, bei neugebauten Trassen durch Anbringung von Temperatursensoren bzw. Lichtwellenleitern zur verteilten Temperaturmessung über eine Aufheizung des Kabels die Kennwerte des umgebenden Bodens zu ermitteln und zusätzlich Trassenbereiche mit besonders hoher Wärmeentwicklung zu identifizieren und ggfs. baulich zu verändern.

8 ENTWICKELTES MESSGERÄT FÜR DIE WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON KABELBETTUNGEN

In den mittels Nadelsonden durchgeführten Messungen hat sich gezeigt, dass eine Charakterisierung der geothermischen Parameter mit einer Kombination verschiedener Methoden und Geräte möglich ist. Trotzdem ist mit Nadelsonden ein wichtiger Bestandteil des Wärmetransportes nicht bestimmbar, nämlich der zusätzliche konvektive Wärmetransport über Wasserdampf aufgrund von Temperaturgradienten. Deswegen wurde ein Messgerät entwickelt, das diese Vorgänge ebenfalls erfasst. Mit dem Gerät sollte dabei die Bestimmung der scheinbaren (kombinierten konduktiv-konvektiven) Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von

- Wassergehalt,
- Trockenrohdichte und Porenraum,
- Temperaturgradienten und
- Wärmestromrichtung möglich sein.

Dabei sollte die Messung wahlweise unter konstantem Druck und Volumen während der Messung oder unter Änderung von Druck und Volumen zwischen den Messungen durchführbar sein. Zusätzlich soll die Proben temperatur variiert werden können. So kann jeweils eine Reihe von Messwerten unter verschiedenen Randbedingungen generiert werden, die zusätzlich der Plausibilitätsprüfung der Messwerte untereinander dient.

Im Folgenden ist die Entwicklung und Validierung des Messverfahrens dargestellt. Eine umfangreiche Anwendung erfolgt später, wenn die Temperaturgradienten und Wassergehalte im Nahbereich um Erdkabel aufgrund der Messergebnisse im Erdkabeltestfeld bekannt sind.

8.1 Analyse von Geräten und Verfahren

Als Basis der Geräte und Verfahrensentwicklung erfolgte eine Analyse und Bewertung vorhandener Techniken für geothermische Untersuchungen sowie thermische Untersuchung von Baustoffen (Tab. 8.1). Die Messgeräte können grundsätzlich in Geräte unterschieden werden, die einen stationären Wärmestrom für die Messung aufbringen und deshalb lange Messzeiten von bis zu einem Tag beanspruchen, und in Geräte, die einen instationären Wärmestrom aufbringen. Deren Mess- und Auswertezeiten liegen im Bereich von Minuten. Zudem können die Messverfahren in absolute und relative Messverfahren unterschieden

werden. Im Gegensatz zu absoluten Messverfahren erfolgt die Auswertung bei relativen Messverfahren auf Basis des Vergleichs des Probekörpers mit einem Standard-Probekörper von bekannter Wärmeleitfähigkeit. Eine Übersicht mit Detailzeichnungen der gebräuchlichsten Geräte findet sich in Farouki (1986). Die für verschiedene Zwecke in der Baustoffprüfung eingesetzten Messgeräte sind in Jurnik (1986) beschrieben.

Tabelle 8.1: Einordnung von Wärmeleitfähigkeitsmessgeräten und -verfahren

Messgerät	Messverfahren				Literatur
	stationär	instationär	absolut	relativ	
Einplattengerät (EPG)	X		X		EN 12667
Wärmestrommessplattengerät (WMG)	X			X	EN 12667
New Steady State Verfahren (NSS)	X			X	Reiter & Hartmann, 1971
Divided Bar Gerät (DB)	X			X	Pribnow & Sass, 1995
Thermoscanner (TCS)		X		X	Popov et al., 1999
Linienquellenverfahren (LQ) mit Halbraum- (HLQ) und Vollraumlinienquellen (VLQ)		X	X		Blackwell, 1954
Transient Hot Bridge (THB) Verfahren		X	X		Gustafsson et al., 1979

Die Bewertung der Eignung verschiedener Geräte erfolgt nach den folgenden Kriterien:

- Messbarkeit von *nassen Proben*,
- Aufbringbarkeit von *hohen Drücken* und *Robustheit* für den Einsatz in bodenmechanischen Labors,
- *Probenstörung* bei der Messung und Störung der hydraulischen Leitfähigkeit,
- *Messunsicherheit* der Wärmeleitfähigkeit im Messbereich 0,3 bis 4 Wm⁻¹K⁻¹ (Messbereich für Böden nach Abschnitt 6.3.1 sowie Messbereich für künstliche Bettungsbaustoffe) und
- Variation der *Temperaturgradienten und der Temperatur* der Probenoberflächen im Bereich von -10 °C bis +80 °C.

Eine Variation der Probentemperatur ist grundsätzlich durch die Einbringung in Klimakammern bei allen Geräten möglich. Da in der Umgebung erhitzter Erdkabel Temperaturgradienten entstehen, die einen zusätzlichen konvektiven Wärmetransport über Wasserdampf hervorrufen, sollte die Möglichkeit, Temperaturgradienten auf die Probe aufzubringen, bei dem entwickelten Gerät ebenfalls abgedeckt werden. In Tabelle 8.2 ist der Erfüllungsgrad der genannten Kriterien durch bestehende Messverfahren und Geräte dargestellt. Hierbei

bedeuten: ++ sehr gut, + gut, 0 neutral, - eher schlecht, -- sehr schlecht. Wird ein Kriterium mit -- bewertet, ist dies ein vollständiges Ausschlusskriterium.

Tabelle 8.2: Bewertung der bewerteten Wärmeleitfähigkeitsmessgeräte

Messgerät	Das Messgerät erlaubt die Untersuchung				
	von nassen Proben	unter hohen Drücken durch scharfkantige Materialien	mit geringer Störung innerhalb der Probe	mit geringer Messunsicherheit	unter Regelung der Temperatur und der Temperaturgradienten in der Probe
EPG	0	--	+	++	++
WMG	0	--	+	+	++
NSS	0	+	+	--	+
DB	+	+	+	+	++
TCS	--	-	+	+	--
LQ	++	+	+	+	--
THB	++	0	0	++	--

Für Vergleichsmessungen und Tests wurden verschiedene der genannten Geräte genutzt. Ein Einplattengerät war an der TU Darmstadt vorhanden, ein Wärmestrommessplattengerät ist im Aufbau ähnlich, weswegen die Ergebnisse übertragen werden konnten. Geräte nach dem New Steady State (NSS) Verfahren sind auf dem Markt nicht erhältlich, deswegen wurde eines am Fachgebiet für Angewandte Geothermie selbst gebaut und getestet (Stegner, 2008). Das Divided Bar Verfahren wurde theoretisch analysiert und bildet mit den Erfahrungen aus dem Bau des NSS Gerätes die Grundlage für ein neuentwickeltes Messgerät. Thermoscanner und Linienquellenverfahren standen ebenfalls am Fachgebiet zur Verfügung, und das Transient Hot Bridge Verfahren (Hammerschmidt & Meier, 2005; Model et al. 2007) wurde mit einem der Erfinder des kommerziellen Messgerätes, dessen Aufbau im Patent DE 10 2004 022206A1 offengelegt ist, an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig getestet.

Das Transient Hot Bridge Verfahren ist sehr gut für die Messung nasser Proben geeignet und erlaubt Messungen mit geringer Messunsicherheit (Tabelle 8.2). Zusätzlich ist mit diesem Verfahren auch die Bestimmung der Wärmekapazität möglich. Da aber Messfolien in die Bodenprobe eingebracht werden müssen, wird die Störung der hydraulischen Leitfähigkeit als groß eingestuft. Es sind auch Sensoren mit Messflächen von ca. 1 cm² verfügbar, diese erfüllen allerdings bei vielen Böden nicht die Forderung eines Messvolumens von mindestens dem Zehnfachen der Abmessung der Poren und Körner analog zu den Anforderungen der EN 12664:2001. Mit einer Veränderung der Sensorabmessungen und der Bauform, so dass die Folien auch unter Druck in scharfkantigen Materialien eingesetzt

werden können, birgt dieses Verfahren u. a. aufgrund der kurzen Messzeiten und der hohen Genauigkeit ebenfalls ein Potenzial für die Feld- und Labormessungen. Das gezielte Aufbringen von großen definierten Temperaturgradienten ist allerdings mit diesem Verfahren in der jetzigen Konfiguration nicht möglich, weswegen es im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt wurde. Als Basis der weiteren Gerätentwicklung wurde auf Grundlage der Tabelle 8.2 das Divided Bar Verfahren ausgewählt.

8.2 Verdichtungs- und temperaturgradientengesteuertes Messverfahren

Für die Untersuchung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Lockergesteinen wurde ein Messgerät entwickelt, welches es ermöglicht, Proben unter Druckkonstanz von bis zu 7,6 MPa oder unter Volumenkonstanz bei Probertemperaturen bzw. Temperaturgradienten von -10 bis +80 °C zu messen. Die Proben können trocken, teil- und vollgesättigt gemessen werden. Sowohl das Messverfahren als auch der Aufbau des Gerätes wurden in Patenten offengelegt (DE 102010036992 A1, EP2607892 und EP2603789).

8.2.1 Messverfahren und Aufbau des Gerätes

Der eigentliche Prüfeinsatz für die Wärmeleitfähigkeit ist in eine Prüfpresse (Abbildung 8.1) eingebaut, die den Anforderungen eines Ödometerversuches nach DIN 18135:2012-04 entspricht.



Abbildung 8.1: Gesamtansicht des Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes

Hierdurch wird bei der Wegmessung eine Auflösung von mindestens 0,001 mm und bei der Kraftmessung eine Genauigkeit von mindestens 0,2 % gewährleistet.

In Abbildung 8.2 ist das Messverfahren schematisch dargestellt. Im Messgerät befindet sich eine Kunststoffplatte mit bekannter Wärmeleitfähigkeit, die bei der Herstellung mittels Einbringung von Füllern (Keramik, Glas, Graphit) auf die zu untersuchenden Proben abgestimmt ist und daher eine Wärmeleitfähigkeit in der gleichen Größenordnung aufweist. In diese ist eine Bohrung mit einem Temperatursensor eingebracht. Die Platte liegt auf einer Kühlplatte, deren Temperatur über die Durchströmung mit temperierten Fluiden geregelt wird. Auf die Kunststoffplatte wird eine Probe aufgelegt. Die Temperatur an der Oberseite der Probe wird mit einer ebenfalls durchströmten Heizplatte geregelt. T_1 und T_3 werden geregelt, T_2 wird gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit der Vergleichsplatte ist bekannt. Die Geometrie (Probendicke und Lage der Temperatursensoren) wird gemessen.

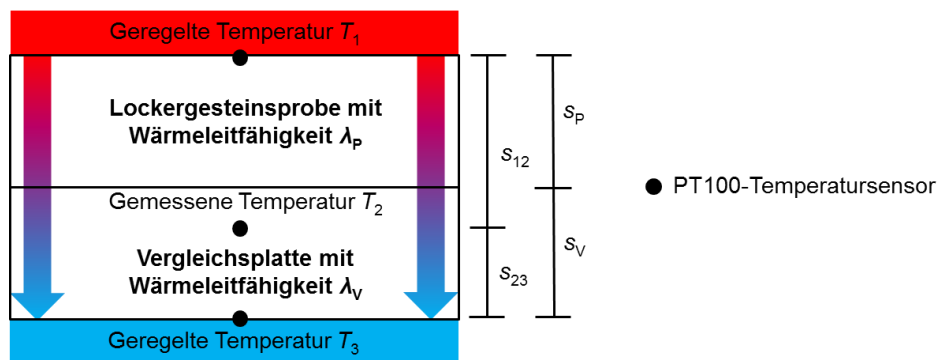


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung des Messverfahrens (Sass & Stegner, 2012)

Die mathematische Beschreibung des konduktiven Wärmetransports innerhalb des Gerätes basiert auf der Fourierschen Differentialgleichung. Ein durch die Heiz- und die Kühlplatte aufgebrachter Temperaturgradient dT zwischen der Ober- und Unterseite von Probe und Vergleichsplatte erzeugt im Gerät einen Wärmestrom, dessen Dichte \dot{q} von der Wärmeleitfähigkeit λ der eingebauten Materialien abhängig ist.

Für die Temperaturen T_1 und T_3 im Gerät und für die Umgebungstemperatur T_U soll bei der Messung Gleichung (8.1) gelten.

$$T_1 \leq T_U \leq T_3 \quad (8.1)$$

Entlang der Mittelachse des Gerätes bildet sich dadurch ein eindimensionaler Wärmestrom über die Strecke s aus. Wärmeströme in radialer Richtung können bei der Auswertung der Temperaturmesswerte in der Mittelachse des Gerätes nach Gleichung (8.2) entfallen.

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{ds} \quad (8.2)$$

Im Messbereich stellen sich im stationären Fall konstante Temperaturen und ein konstanter Wärmestrom ein, und es bildet sich über die Höhe der Materialien ein lineares Temperaturgefälle in der Strömungsrichtung aus. Integrieren mit den Integrationsgrenzen der Temperatur T und der Strecke s bringt Gleichung (8.3).

$$\dot{q} = -\frac{\Delta T}{\frac{s}{\lambda}} \quad (8.3)$$

Zwischen den Temperatursensoren T_2 und T_3 befindet sich die homogene Vergleichsplatte mit der bekannten Wärmeleitfähigkeit λ_V . Zwischen den Sensoren T_1 und T_3 sind die Probe mit der unbekannten Wärmeleitfähigkeit λ_P und ein Abschnitt der Vergleichsplatte eingebaut. Damit ergeben sich für die Wärmeströme die Gleichungen (8.5) und (8.6).

$$\dot{q} = -\frac{T_2 - T_3}{\frac{s_{23}}{\lambda_V}} \quad (8.4)$$

$$\dot{q} = -\frac{T_1 - T_3}{\frac{s_V}{\lambda_V} + \frac{s_P}{\lambda_P}} \quad (8.5)$$

Gleichsetzen von Gleichung (8.5) und (8.4) und Auflösen nach der unbekannten Wärmeleitfähigkeit der Probe bringt Gleichung (8.6) zur Auswertung der Messdaten.

$$\lambda_P = \frac{\lambda_V \cdot s_P}{\left(\frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_3}\right) s_{23} - s_V} \quad (8.6)$$

Der mechanische Aufbau des Prüfeinsatzes ist als Explosionszeichnung Abbildung 8.4 und als Schnitt durch das zusammengefügte Bauteil in Abbildung 8.4 dargestellt. Eine Rundstange aus massivem Edelstahl verbindet den Prüfeinsatz oben mit dem in der Prüfpresse eingebauten Kraftaufnehmer. Über eine daran angebrachte Edelstahlplatte wird die Kraft homogen über eine thermische Entkopplungsplatte auf die Heizplatte aufgebracht. Der Prüfeinsatz kann im Betrieb mit einer Moosgummimatte gegen Temperaturschwankungen in der Umgebung gedämmt werden.

Im oberen Bereich sind alle Schraubverbindungen mit thermisch entkoppelten Schraubenhülsen ausgeführt, die für diese Anwendung entwickelt wurden. An die Temperierplatte zur Schaffung von homogenen Umgebungsbedingungen in der oberen Umgebung und oberhalb der Probe ist der eigentliche Temperierzylinder für die Probenoberfläche angebracht. Dieser wird in den darunterliegenden Probenbehälter aus Plexiglas eingefahren. Der Probenbehälter ist aus Plexiglas gefertigt, um Schichtungen beim Probeneinbau zu erkennen.

Zudem besitzt Plexiglas mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,19 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gute Dämmeigenschaften.

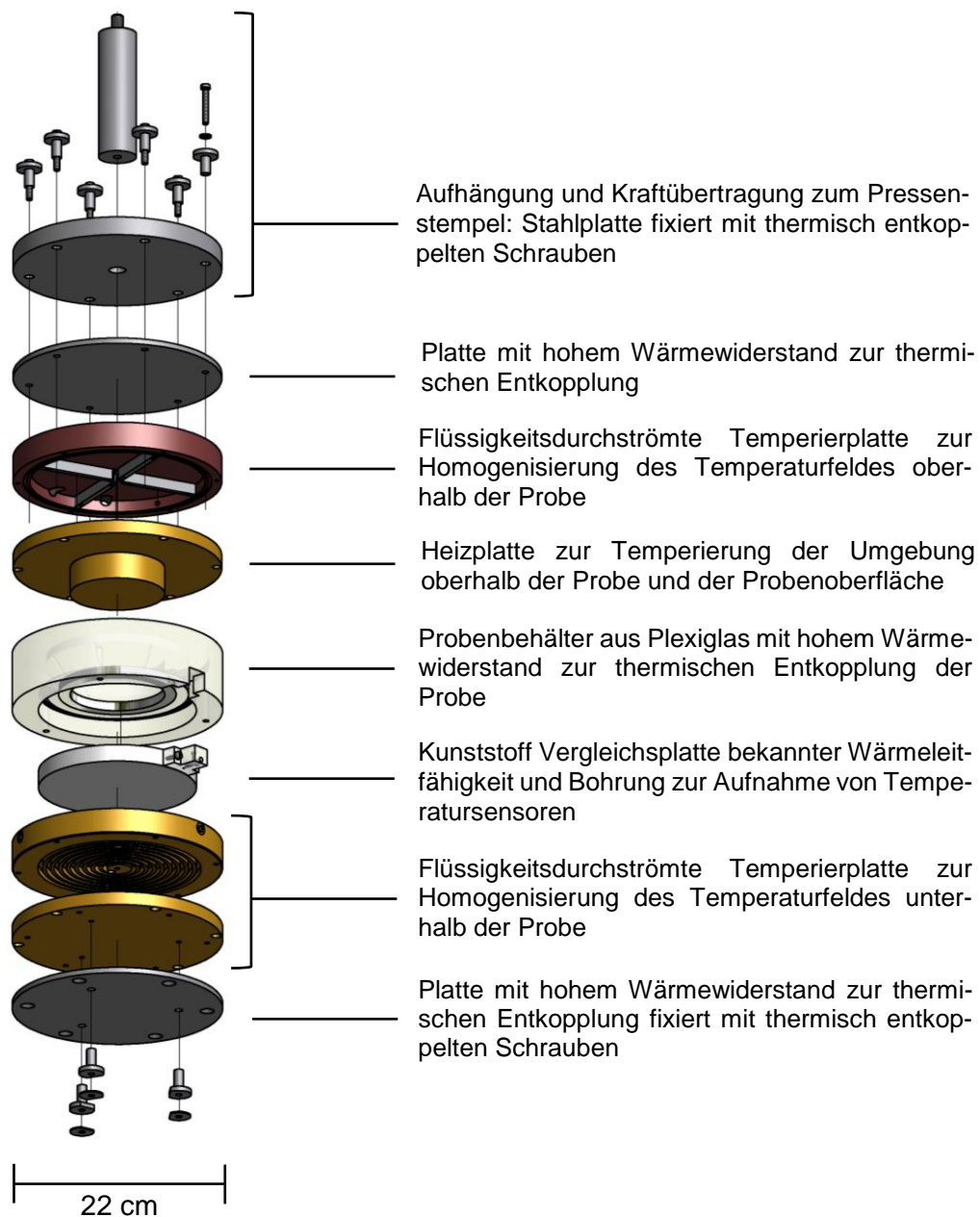


Abbildung 8.3: Explosionszeichnung des Prüfeinsatzes

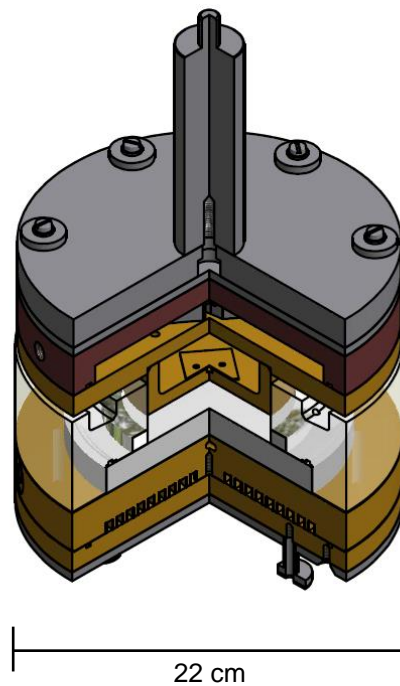


Abbildung 8.4: Schnitt durch den Prüfeinsatz

Der Probenbehälter und die Probe liegen auf der Kunststoff-Vergleichsplatte auf und dichten über O-Ringe ab. Seitlich in die Vergleichsplatte ist eine Führung zur Installation von PT100-Widerstandsthermometern oder Thermoelementen angebracht. Die zugehörige Bohrung führt bis zum Mittelpunkt der Vergleichsplatte. Unterhalb der Vergleichsplatte befindet sich wiederum eine Temperierplatte, die mit thermisch entkoppelten Schrauben über eine thermische Entkopplungsplatte am unteren Stempel der Prüfpresse befestigt ist.

Die Probe kann aus dem Probenbehälter (Abbildung 8.5) über einen seitlich angebrachten Filter entwässern, so dass drainierte Versuche durchgeführt werden können. Zur Durchführung von undrainierten Versuchen wird der Filter durch Plexiglas ersetzt.

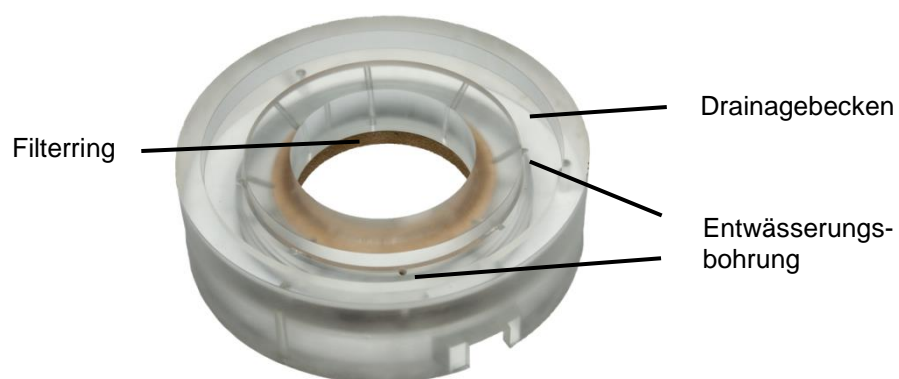


Abbildung 8.5: Probenbehälter mit Filterring und Entwässerungskanälen

8.2.2 Temperierung und Kalibrierung der Temperatursensoren

Zur Temperierung der Proben werden zwei Umwälzthermostate Typ Ministat 230-cc der Firma Huber eingesetzt. Sie verfügen jeweils über einen internen und einen externen Temperatursensor. Damit besteht die Möglichkeit der Erfassung und Steuerung der internen Badtemperatur und der externen Prozesstemperatur. Über die externen Sensoren sind die Heiz- bzw. Kühlplattentemperatur geregelt. Die Datenerfassung und die Versuchssteuerung erfolgen über eine RS232-Schnittstelle.

Technische Daten des Thermostates nach DIN 12876:

- Temperaturbereich -40 bis 200 °C
- Auflösung Temperaturanzeige 1/100 °C
- Temperaturkonstanz (-10 °C) 0,02 K

Zur Quantifizierung und Minimierung der Messunsicherheiten werden regelmäßig Kalibrierungen der Gerätesensoren durchgeführt. Zur Bestimmung einer Referenztemperatur wird das Handmessgerät P795 der Firma DOSTMANN electronic eingesetzt. Das Gerät wird jährlich in einem nach den Richtlinien des Deutschen Kalibrierdienstes akkreditierten Labor kalibriert.

Kleinste angebbare Messunsicherheiten des Handmessgerätes:

- -100 °C bis <58 °C 0,01 °C
- 58 °C bis 110 °C 0,02 °C
- >110 °C bis 205 °C 0,03 °C
- >205 °C. bis 420 °C 0,04 °C

Für die Kalibrierung der Gerätesensoren wird eines der am Gerät vorhandenen Thermostate genutzt, in dessen Bad ein zusätzliches Kalibrierbad zur Homogenisierung der Badtemperatur eingesetzt wird. Das Kalibrierbad wurde für die Anwendung mit den Ministat Thermostaten neu konstruiert, um ausreichend Platz zum Einhängen von größeren Sensorbündeln zu bieten. Der Aufbau sowie die Strömungsrichtung des Wassers im Bad sind in Abbildung 8.6 dargestellt. Es handelt sich um ein Metallbecken, das von einem Kupferrohrsystem umschlossen wird. Die Pumpe des Thermostates wird an die Röhren angeschlossen (Wassereinlass). Damit wird ein Wasserkreislauf um das Becken erzeugt bevor das Wasser in das Becken von unten einströmt. Hierdurch wird eine konstante und homogene Temperatur innerhalb des Beckens gewährleistet. Die Messung der Temperaturen innerhalb des Bades bei 20 °C Regeltemperatur in Raumtemperaturumgebung ergibt nach einer Stunde Abweichungen von maximal 0,005 °C.

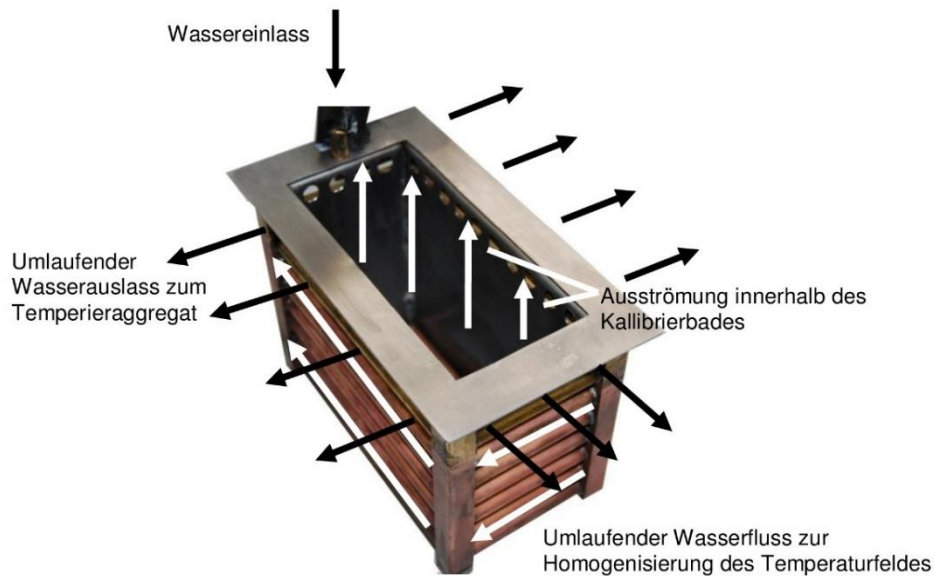


Abbildung 8.6: Kalibrierbad für die Temperatursensoren

Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt entsprechend der Richtlinie des Deutschen Kalibrierdienstes DKD-R 5-1 für Widerstandsthermometer und DKD-R 5-3 für Thermoelemente. Die Sensoren werden als Bündel in das Becken eingebracht, und die Sensorköpfe werden auf gleicher Höhe miteinander verbunden. Zusätzlich werden sie durch einen Plexiglasdeckel mit Klemmschrauben im Kalibrierbecken fixiert. Die Temperaturwerte des Handmessgerätes werden für eine Mehrpunktkalibrierung mit linearer Interpolation zwischen den Punkten im Thermostat hinterlegt.

Neben den Sensoren im Mittelpunkt der Heiz- und Kühlplatte, die die Regelparameter direkt an die Thermostate übermitteln, sind weitere PT100 bzw. Thermoelemente in der Vergleichsplatte sowie zur Dokumentation der Raumtemperatur und der Temperaturen im Randbereich der Heiz- und Kühlplatte über einen A/D-Wandler direkt an den PC angeschlossen. Für die Kalibrierung dieser Sensoren wurde eine Software in der Entwicklungsumgebung Labview entwickelt. Sie liefert eine Kalibrierdatei, die dann in die Auswertesoftware eingelesen wird.

Über das Programm können bis zu 8 Thermometer am A/D Wandler gleichzeitig ausgelesen werden. Als Referenzmessung dient wieder das Handgerät nach Abschnitt 8.2.2, das über den USB Anschluss direkt an den PC angeschlossen wird.

Die Anzahl der Temperaturschritte ist nicht begrenzt. Die Haltedauer jeder Temperaturstufe beträgt bei der Kalibrierung mindestens eine Stunde. Bei Temperaturschritten größer 15 °C wird eine Haltedauer von zwei Stunden gewählt. Die Werte des Handmessgerätes

und des Prozessfühlers werden grafisch über die Zeit dargestellt. Nach jedem Schritt werden die Ergebnisse in die Datentabelle eingetragen, wo die Temperaturen der Sensoren im Kalibrierbad und des Handmessgerätes, Widerstände und maximale und minimale Temperaturen einsehbar sind.

Am Ende der Kalibrierung werden die Messergebnisse und die Polynomkoeffizienten, bzw. die Stützpunkte der Kennlinie in eine Textdatei im Applikationsordner geschrieben. Eine Kalibrierung beginnend mit einer minimalen Temperatur von 10 °C in 4 Schritten bis 50 °C hat sich hierbei als zielführend für Sensoren in und um die Vergleichsplatte herausgestellt. Mit Wasser als Kältemittel werden aufgrund der Verdunstung Kalibrierungen höchstens bis 80 °C durchgeführt. Kondensations- und Verdampfungsprozesse können zu Ungenauigkeit und unruhigen Temperaturen im Kalibrierbecken führen.

8.2.3 Vergleichsplatte

Für die Herstellung der Vergleichsplatte wurden verschiedene Materialien getestet. Die Anforderungen an das Material sind

- sehr geringe Wasseraufnahme,
- kein Quellen,
- Druckfestigkeit größer 8 MPa,
- E-Modul größer 3000 MPa,
- Homogenität der thermischen und der Festigkeitseigenschaften,
- einstellbare Wärmeleitfähigkeit im Bereich 0,3 bis 8 Wm⁻¹K⁻¹,
- hohe Kerbschlagfestigkeit und
- gute Bearbeitbarkeit.

Bei einem klassischen Divided-Bar-Verfahren werden zwei Glasplatten als Referenzkörper genutzt. Da dünne Kanäle, wie sie zur Einbringung eines Temperatursensors notwendig sind, in Glasplatten nur mit erheblichem Aufwand und Kosten mit Lasern eingebracht werden können, werden die Temperaturmessungen an der Ober- und Unterseite der beiden Glasplatten innerhalb von aufgelegten Kupfer- oder Messingscheiben durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass in solchen Geräten die Messwerte durch jeweils zwei Übergangswiderstände an den vier Kupfer- oder Messingscheiben und zusätzlich durch zwei Übergangswiderstände an der Probe gestört werden. Der Wärmestrom wird somit durch 10 nicht exakt definierte Übergangswiderstände verändert bzw. die Messung gestört.

Im hier entwickelten Gerät wird die Messung innerhalb eines Referenzmaterials durchgeführt, so dass insgesamt nur drei Übergangswiderstände an den Grenzen von Heizplatte-Referenzmaterial, Referenzmaterial-Probe, Probe-Kühlplatte entstehen.

Nach Versuchen mit unterschiedlichen Harzen und Kunststoffen wurde als Grundmaterial für die Kunststoffplatte Polyphenylensulfid (PPS) gewählt, das je nach Wahl mit einem Keramik-, Glas- oder Graphitfüller auf eine Wärmeleitfähigkeit zwischen $0,3$ bis $8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ gefertigt werden kann.

Die Berechnung der Verformung der Platte aufgrund der aufgebrachten Drücke erfolgt nach Gleichung (8.7).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (8.7)$$

Hieraus folgt, dass beim maximalen Pressdruck von 8 MPa und einem Elastizitätsmodul von 4200 MPa eine vertikale Verformung der Platte von $1,9 \text{ ‰}$ auftritt.

Zusätzlich entstehen temperaturabhängige Verformungen. Die Plattentemperatur variiert im Regelfall in den Versuchsreihen zwischen 10 bis 40 °C . Die dabei entstehende Verformung berechnet sich nach Gleichung (8.8).

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \quad (8.8)$$

Daraus folgt bei einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $0,55 \cdot 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$ eine maximale Ausdehnung der Platte von $2,2 \text{ ‰}$. Die Spannungs- und Temperaturzustände der Platte liegen bei maximalem Pressdruck der eingesetzten Prüfpresse weit unter den Festigkeitsgrenzen des Grundmaterials PPS nach Tabelle 8.3. Deswegen ist von einer linearen Stauchung der Platte im Betriebsbereich auszugehen.

In Abbildung 8.7 sind die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen elektrischen, magnetischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften zum Gehalt des Füllstoffes Graphit dargestellt. Dabei ist der Elastizitätsmodul des Füllstoffes größer als der des Kunststoffes. Die Zugfestigkeit nimmt aufgrund der Störung der Vernetzung des Materials mit Zunahme des Füllstoffgehaltes ab. Im Gerät wird die Platte nicht auf Zug, sondern auf Druck belastet, bei der vorliegenden Druckfestigkeit sind bei den in der Platte verwendeten Füllstoffgehalten keine negativen Auswirkungen zu erwarten. Eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit mit dem Füllstoffgehalt hat keine Auswirkung auf die Funktionalität der Platte. Die Veränderung der Festigkeitseigenschaften kann sinngemäß auch auf die Verwendung von Glas- und Keramikfüllern übertragen werden. Die für die Funktion der Platte relevanten Werte der Wärmeleitfähigkeit und des E-Moduls nehmen mit der Füllstoffdotierung zu. Dies

bewirkt mit zunehmendem Füllstoffgehalt eine Verringerung der Verformung unter Druckbelastung. Die maximale Verformung der Grundmasse liegt beim Maximaldruck der Presse im Toleranzbereich.

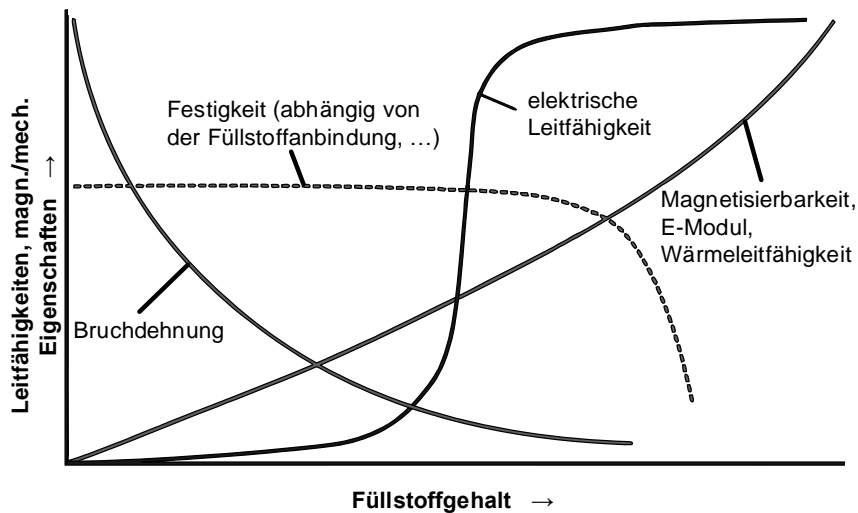


Abbildung 8.7: Prinzipielle Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften bei graphitgefüllten Kunststoffen (verändert nach Amesöder, 2007)

8.2.3.1 Plattenherstellung

In Grundler et al. (2014) sind die Auswirkungen der Anwendung des Spritzgießverfahrens bei der Herstellung von Kunststoffteilen auf die Einregelung von Füllstoffen dargestellt.

Beim Spritzgießen bildet sich eine strömungsinduzierte Orientierung der Füllstoffpartikel aus. In Abbildung 8.8 ist die Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Bauteilanschnittes dargestellt. Der Spritzgussansatz befindet sich in der Mitte des rechten Randes. Für die Probe mit Graphit-Compounds zeigt sich eine Quellströmung, bedingt durch die Effekte von Dehn- und Scherströmungen. Hierdurch werden die Füllstoffe in den Randbereichen in Fließrichtung und in der Probenmitte senkrecht zur Fließrichtung ausgerichtet.

Beim Aushärten der Kunststoffschmelze erfolgt die Ausbildung einer anisotropen Schichtstruktur, die die Wärmeleitfähigkeit der Bauteile signifikant beeinflusst. Die Untersuchungen lassen auf anisotrop-thermisches Verhalten von im Spritzgussverfahren hergestellten füllstoffdotierten Bauteilen schließen.

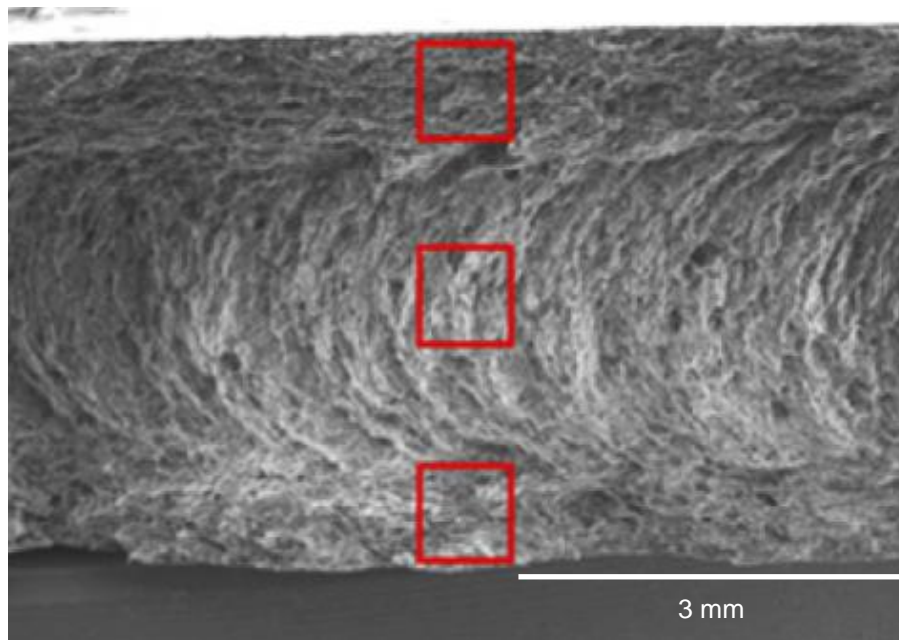


Abbildung 8.8: Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Ausrichtung eines Graphitfüllstoffes beim Spritzgießverfahren in einer Kunststoffplatte, Einspritzrichtung von rechts nach links (verändert nach Grundler et al., 2014)

Die Anisotropie der thermischen Eigenschaften zwischen axialer und radialer Richtung ist grundsätzlich unproblematisch, allerdings ist die Isotropie innerhalb einer Richtung für den definierten Wärmetransport in der Platte notwendig. Deswegen wurde das in der Kunststofftechnik selten angewandte Heißpressverfahren für die Herstellung verwendet. Beim Heißpressverfahren wird das Granulat in einer Form auf die Schmelztemperatur des Granulats erhitzt und mit Druck beaufschlagt. Da in der Kunststofftechnik die Herstellung von Platten mit hohen Materialstärken eher unüblich ist, wurde eine Metallform für die Herstellung angefertigt. Die Form wird über einen beheizten Pressenstempel und zusätzlich von der Seite mittels eines elektrischen Heizringes während des Pressvorganges beheizt. Nach Abschluss des Pressvorganges muss die Platte definiert abgekühlt werden, um spannungsbedingte Rissbildung aus dem Abkühlprozess (Abbildung 8.9) zu vermeiden. Mit diesem Verfahren konnten die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse bezüglich Dichte und Homogenität der Platten erzielt werden.



Abbildung 8.9: Aufgesägte Kunststoff-Vergleichsplatten mit Spannungsrissen aufgrund zu schneller Abkühlung (Durchmesser 16 cm)

8.2.3.2 Poren in der Kunststoffplatte

Die Korndichte wurde mit dem Heliumpyknometer AccuPyc 1330 der Micromeritics Instrument Corporation an drei Proben aus der Gesamtmasse des Kunststoffgranulats vor der Plattenherstellung bestimmt. Dabei betrugen die Abweichungen der Messungen an den drei unterschiedlichen Proben weniger als ein Prozent. Der Korndichte wurde aus dem Mittelwert der Messungen auf $2,68 \text{ gcm}^{-3}$ bestimmt. Anschließend wurden Platten mit unterschiedlichen Aufschmelzgraden des Granulates hergestellt. Die Dichte der Kunststoffplatten selbst wurde ebenfalls an Abschnitten mit dem Pyknometer ermittelt. Die geringsten Dichten der gepressten Kunststoffplatte betrugen dabei $2,62 \text{ gcm}^{-3}$.

Damit ergibt sich ein maximaler Porenanteil der Platte von 2,3 % unter Verwendung des Pressverfahrens zur Herstellung. Dieser maximale Porenanteil ergab sich bei Platten, an denen die Granulatstruktur noch deutlich erkennbar war (Abbildung 8.10). Homogene Platten wiesen Werte unterhalb 1 % auf. Wie im Weiteren gezeigt wird, sind mit diesen Porenanteilen homogene thermische Eigenschaften erreichbar.

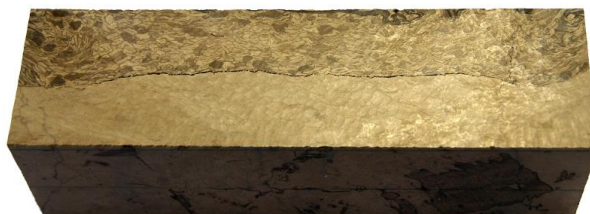


Abbildung 8.10: Abschnitt einer stark inhomogenen (obere Hälfte) und inhomogenen (untere Hälfte) Polyphenylensulfid-Pressung (Länge 14 cm)

8.2.3.3 Homogenität der thermischen Eigenschaften

Die Wärmeleitfähigkeit der Vergleichsplatte wird mit dem Messgerät TK04 über mehrere Serienmessungen bei 20 °C nach dem Verfahren nach Blackwell (1954) bestimmt. Die Messungen wurden an verschiedenen Positionen durchgeführt. In Abbildung 8.11 ist die Serienmessung an einer von drei Positionen an der Plattenoberfläche bestehend 99 Einzelmessungen dargestellt. Zwischen jeder Messung wurde eine 15-minütige Pause zur Homogenisierung der thermischen Randbedingungen eingehalten. Die Abweichungen innerhalb der Serien variieren zwischen 1,9 % und 2,2 %, und die Abweichungen zwischen den Serien liegen bei 0,26 %. Die Werte zeigen damit sehr homogene Wärmeleitfähigkeiten über die gesamte Plattenoberfläche. Dies wurde durch weitere Einzelmessungen bestätigt.

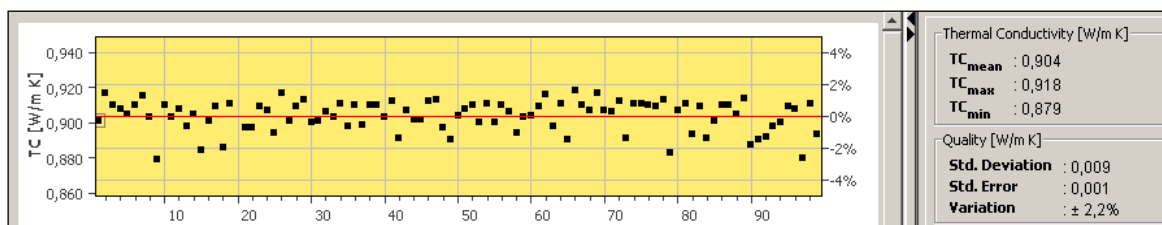


Abbildung 8.11: Serienmessung aus 99 Einzelmessungen der Wärmeleitfähigkeit einer Kunststoff-Vergleichsplatte an Position 1

Die Ergebnisse der Messungen an Position 1 bis 3 sind in Tabelle 8.3 zusammengefasst. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Platte beträgt $0,906 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Zusätzlich wurde die Wärmeleitfähigkeit mit dem Thermoscanner nach Popov (1999) über die gesamte Fläche ermittelt. Dabei ergeben sich eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von $0,94 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und eine mittlere Temperaturleitfähigkeit von $0,46 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$. Die Messgenauigkeit der beiden Messverfahren wird mit einem Wert von 3 % von den Geräteherstellern angegeben, womit eine Gesamtabweichung von 3,2 % zwischen den Messverfahren im Toleranzbereich liegt.

Tabelle 8.3: Wärmeleitfähigkeit der Kunststoff-Vergleichsplatte

Position	Anzahl Messungen	Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$				Abweichung in %
		Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	Standardabweichung	
1	99	0,904	0,918	0,879	0,009	± 2,2
2	73	0,907	0,919	0,881	0,007	± 2,1
3	99	0,908	0,922	0,887	0,007	± 1,9

8.2.3.4 Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

An einer weiteren Platte aus einem glasfaserdotierten PPS-Granulat wurde die Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Temperaturen axial als Mittelwert über die gesamte Fläche mit dem Plattengerät bestimmt (Abbildung 8.12). Im Bereich von 10 °C bis 40 °C steigt die Wärmeleitfähigkeit um 1,55 %. Die Ergebnisse bestätigen sich bei punktuellen Messungen der axialen Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur nach dem Transient Hot Bridge Verfahren.

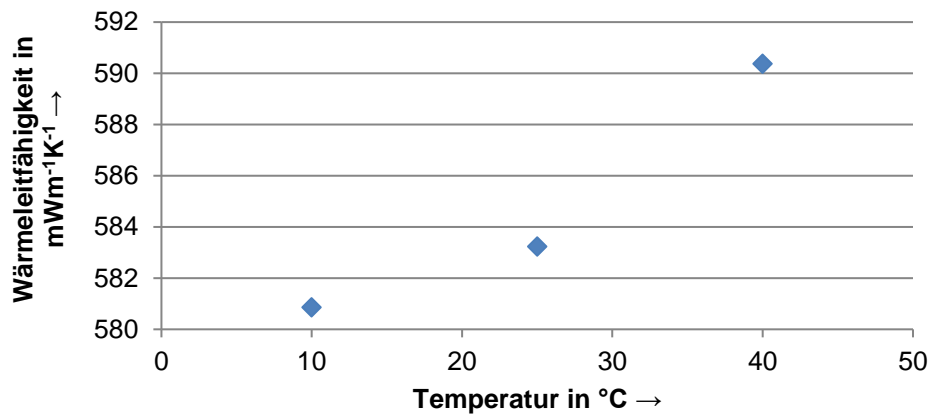


Abbildung 8.12: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit einer glasfaserdotierten PPS-Platte

8.2.3.5 Bestimmung der Sensorposition in der Vergleichsplatte

Die Dicke der Platten und damit die Sensorpositionen in den Platten können variieren. Der Sensor wird horizontal im Mittelpunkt der Vergleichsplatte in eine Bohrung eingesetzt. Geringe horizontale und vertikale Abweichungen sind beim Absetzen der zugehörigen Bohrung mit einer Länge von 9 cm und einem Durchmesser von 1,6 mm unvermeidlich. Während eine geringe horizontale Abweichung aber keine Auswirkung bei der Auswertung der Wärmeleitfähigkeit hat, bewirkt eine vertikale Abweichung zwischen dem tatsächlichen und dem für die Auswertung verwendeten Wert einen erheblichen Berechnungsfehler. Deswegen muss der Abstand S_{23} ermittelt werden.



Abbildung 8.13: Vergleichsplatte mit Führung zur Fixierung des Temperatursensors (Durchmesser 16 cm)

Dabei wird die vertikale Position thermisch ermittelt. Hierfür wird die Platte ohne Probe in das Messgerät eingelegt und mit konstantem Druck zwischen der Heiz- und der Kühlplatte eingespannt. Anschließend werden die Heiz- und die Kühlplatte auf 30 °C und 15 °C konstant temperiert. Über die Annahme eines linearen thermischen Gradienten über die Plattendicke wird die Position über die Temperaturmessung in der Bohrung ermittelt. Es werden zwei Messungen durchgeführt, bei denen sich der geringere Abstand des Sensors zur Plattenoberfläche oben befindet. Danach wird die Vergleichsplatte umgedreht (Abbildung 8.14). Der Sensor befindet sich dann in der unteren Hälfte der Platte, und die Messungen werden wiederholt. Zusätzlich werden weitere Versuche mit veränderten Temperaturen durchgeführt.

Für die Untersuchung von besonders scharfkantigem Material kann die Platte mit einem Messingblech ($d = 0,53 \text{ mm}$) geschützt werden, wodurch aber zusätzliche Übergangswiderstände ähnlich dem Divided-Bar-Verfahren entstehen. Die Kalibrierung mit Messingplatte erfolgt analog zur beschriebenen Methode unter zusätzlicher Verwendung der Messingplatte.

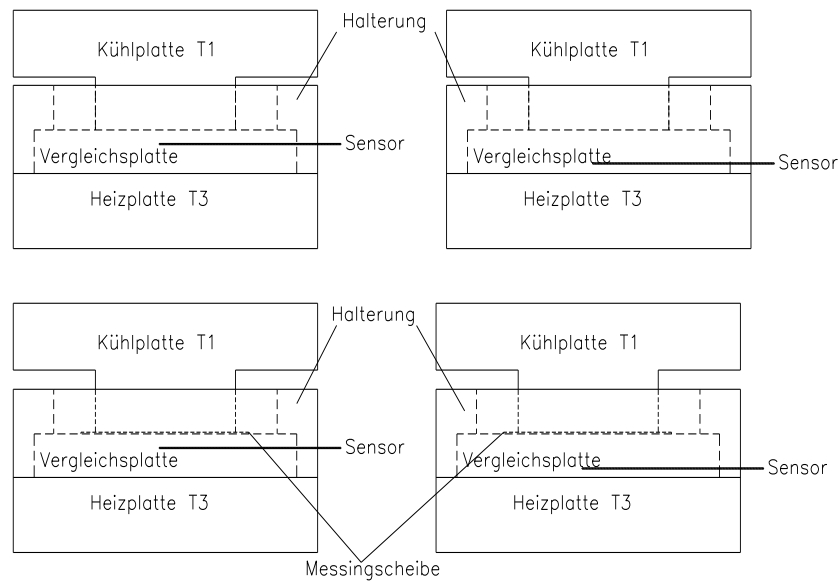


Abbildung 8.14: Versuchsanordnungen zur Positionsbestimmung des Temperatursensors in der Vergleichsplatte

In Tabelle 8.4 sind die rechnerischen Auswertungen der Strecken, sowie die Abweichungen aus den Temperaturmessungen für eine Plattenkalibrierung dargestellt. In den Messergebnissen sind geringe Abweichungen von maximal 2,03 % vom Mittelwert der Positionsmessung mit dem Sensor in der oberen Plattenhälfte und den Messungen mit Sensor in der unteren Plattenhälfte bei Versuchen ohne Messingblech zu erkennen.

Bei den Versuchen mit einem aufgelegten Messingblech verringert sich die Standardabweichung der Messwerte aufgrund der Homogenisierung der Oberflächentemperatur über das Messingblech untereinander, allerdings sind höhere Abweichungen zum Mittelwert der Versuche ohne Messingblech erkennbar. Die Abweichungen können aufgrund leichter Verformung oder Verschmutzungen zwischen Messingblech und Vergleichsplatte weiter ansteigen. Bei Weiterentwicklungen des Gerätes könnte das Aufschmelzen eines Schutzbleches bei der Herstellung der Vergleichsplatte diese Abweichungen verringern. Für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen war aber die Härte der reinen Kunststoffplatte ausreichend.

Die maximale Abweichung bei den Untersuchungen ohne Messingblech beträgt 0,58 mm. Dieser Wert entspricht der Hälfte des Sensordurchmessers in der Bohrung (1,4 mm). Für die Auswertung von Messungen wird der Mittelwert der Streckenmessung s_{23} verwendet.

Tabelle 8.4: Ergebnisse und Abweichungen der Positionsmessung des PT100

Kalibrierung	Versuch	Rechnerische Auswertung der Streckenmessung s_{23} in mm	Versuche ohne Messingblech Mittelwert s_{23} in mm	Abweichung vom Mittelwert s_{23} in %	Standardabweichung der Messwerte in %
ohne Messingblech	1	14,105	14,386	1,99	1,97
	2	14,099		2,03	
	3	14,682		-2,02	
	4	14,657		-1,85	
mit Messingblech	5	13,823		4,07	1,09
	6	13,789		4,33	
	7	14,099		2,03	
	8	14,103		2,00	

8.2.4 Messunsicherheiten

Die Messunsicherheiten, die bei der Messung, bzw. Auswertung entstehen setzen sich aus den einzelnen Messunsicherheiten der im Versuchsaufbau eingesetzten Sensoren zusammen. Die Berechnung der Abweichung erfolgt aus dem totalen Differential der Auswerteformel für die Wärmeleitfähigkeit der Probe. Das totale Differential ist nach Gleichung (8.9) definiert.

$$f(x_1, x_2 \dots x_n) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot dx_i \quad (8.9)$$

Differenzierung von Gleichung (8.9) nach den einzelnen Messgrößen der Temperaturen und Strecken ergibt Gleichung (8.10).

$$f = \lambda_V \cdot s_P \frac{-\frac{s_{23}}{T_2 - T_3} \cdot dT_1 + s_{23} \frac{T_1 - T_3}{(T_2 - T_3)^2} \cdot dT_2 - s_{23} \frac{T_1 - T_2}{(T_2 - T_3)^2} \cdot dT_3 + ds_V - \frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_3} \cdot ds_{23}}{\left(\frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_3} \cdot s_{23} - s_V\right)^2} + \frac{s_P \cdot d\lambda_V + \lambda_V ds_P}{\frac{T_1 - T_3}{T_2 - T_3} \cdot s_{23} - s_V} \quad (8.10)$$

Da die Abstände s_V und s_P sehr genau bei der Messung bestimmt werden, geht in die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Probe im Wesentlichen der Fehler der Temperaturmessung (T_1, T_2, T_3) und der Fehler in der Bestimmung von s_{23} ein. Diese Fehler werden nun für eine typische Messung abgeschätzt. Die Temperaturdifferenz zwischen T_1 und T_3

soll 30 K betragen. Die Randbedingungen für die Berechnung sind in Tabelle 8.5 dargestellt.

Tabelle 8.5: Randbedingungen für die Fehlerrechnung

λ_V in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	λ_P in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	T_1 in $^{\circ}\text{C}$	T_2 in $^{\circ}\text{C}$	T_3 in $^{\circ}\text{C}$	s_V in mm	s_P in mm	s_{23} in mm
1	2	40	26	10	25	25	20

Der Summe der Abweichungen von λ_P aufgrund von Abweichungen in der Temperaturmessung von T_1, T_2 und T_3 wird nach Gleichung (8.10) maximal, wenn die Abweichung von T_1 und T_3 das entgegengesetzte Vorzeichen gegenüber der Abweichung von T_2 besitzen. Dieser Extremfall ist in Abbildung 8.15 dargestellt. Da die maximalen Abweichungen bei der Temperaturmessung $0,03^{\circ}\text{C}$ betragen, sind die daraus folgenden Messunsicherheiten auf $0,0225 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, also 1,1 % des Sollwertes begrenzt. Die Abweichung der Streckenmessung s_{23} beträgt nach der Kalibrierung maximal 0,3 mm, was zu Abweichungen von $0,09 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, also 4,5 % relativem Fehler führen kann. Zusätzlich kann eine Abweichung bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Vergleichsplatte λ_P auftreten. Diese kann durch Serienmessung auf 2 % begrenzt werden, was zu Abweichungen bei der Auswertung von ebenfalls 2 % führen kann.

Hieraus ergibt sich in der ungünstigsten Kombination eine Abweichung in der berechneten Wärmeleitfähigkeit der Probe von 7,6 % des Sollwertes.

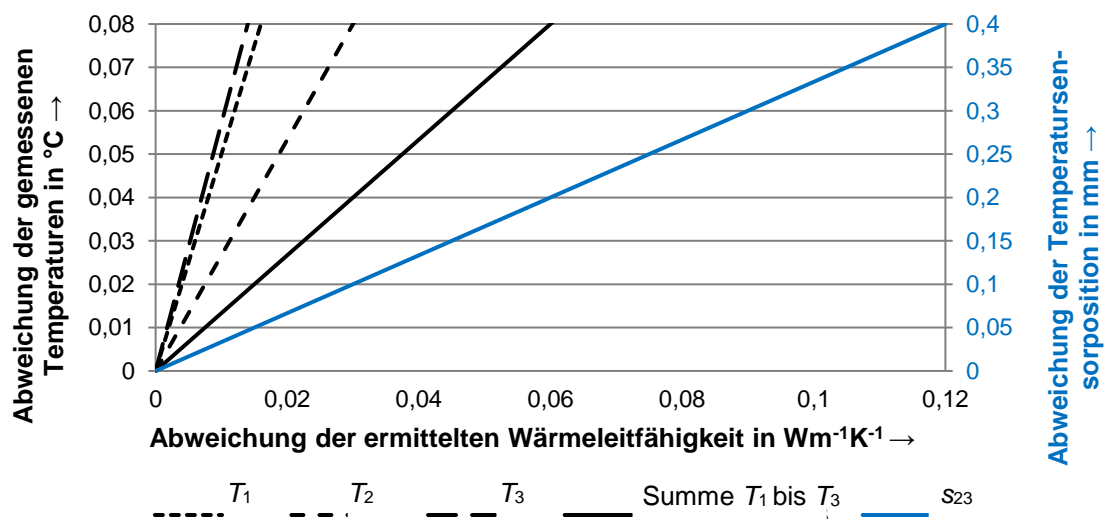


Abbildung 8.15: Abweichung bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

8.2.5 Versuchsdurchführung

In Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften der Probe sind verschiedene Messvarianten durchführbar. Feste Proben werden kraftgesteuert gemessen, da kaum messbare Verformungen bis zur maximalen Presskraft zu erwarten sind und die Wärmeleitfähigkeit somit bei konstantem Volumen und vorgegebenem Anpressdruck bestimmt wird. Locker gelagerte Proben werden weggesteuert gemessen. So kann die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Porenraumvolumen bzw. der Dichte bestimmt werden.

Die Eingabeparameter für die einzelnen Versuchsschritte sind:

- Kraft in kN bzw. Verfahrenweg ($Kraft_{soll}$, Weg_{soll})
- Temperatur der oberen Heizplatte ($T_{1, soll}$)
- Temperatur der unteren Kühlplatte ($T_{3, soll}$) und die
- Versuchsdauer (bei Neustart des Gerätes werden 2 h für die homogene Erwärmung der Thermostate und der Heiz- bzw. Kühlplatte benutzt, für die weiteren Versuchsschritte jeweils 1 h).

Da die Steuerungssoftware im Verlauf der Entwicklung mehrfach überarbeitet wurde und später für die kommerzielle Vermarktung an die Plattform GEOsys 8.7.8 des Herstellers APS GmbH (Wille Geotechnik) angepasst wurde, sind im Folgenden die Vorgänge in den Versuchsschritten allgemeingültig und softwareunabhängig dargestellt.

Um Kontakt zwischen Heizplatte und Probe herzustellen, wird der Stempel verfahren, bis eine Kraft von 1 N als Messwert der Kraftmessdose erreicht wird. Bei diesem Wert wird gerade Kontakt zwischen der Probe und der oberen Kühlplatte hergestellt, und es wird noch keine relevante Spannung in der Probe erzeugt. Die nach der Einregelung auf diese Kraft erreichte Position wird als Startpunkt festgelegt.

Anschließend wird der Weg des Pressenstempels entsprechend den eingegebenen Schritten verändert. Währenddessen erfolgt in einer Schleife ständig die Ablesung der Druckkraft. Wird eine vorher definierte maximale Druckkraft überschritten, wird das Verfahren des Stempels beendet. Sobald die Stempelposition im Bereich $\pm 0,01$ mm zur Zielposition liegt, wird das Verfahren des Stempels abgebrochen und der Weg ausgelesen. Der Vorschub erfolgt mit $0,1 \text{ mm min}^{-1}$. Damit wird gewährleistet, dass die Regelungseinheit der Presse die Verformung stoppen kann, bevor der Zielwert überschritten wird. Nach Erreichen der Zielposition beginnt der Vorgang der Datenaufzeichnung. Es werden die Versuchsnummer, Datum und Uhrzeit erfasst. Während dieser Schritte sind die Thermostate noch nicht eingeschaltet.

Die Eingabeparameter für die Versuche werden an die Thermostate übergeben. Sie beinhalten den Soll-Temperaturwert, Zeitpunkte zum Ein- oder Ausschalten der Temperierung und Drehzahl der Umwälzpumpe.

Der aktuelle Zustand der Presse wird ausgelesen und am Bildschirm dargestellt. Dies sind die Druckkraft der Druckmessdose und der aktuelle Weg. Die ohmschen Widerstände der Temperatursensoren werden über die Kalibrierungsdatei in Temperaturen umgerechnet und dargestellt.

Alle Daten werden im gewünschten Zeitabstand, der in der Software einstellbar ist, in Tabellen gespeichert. Parallel zur Datenaufzeichnung läuft in einer Schleife die Kontrolle des „Power“ Schalters in der Software. Wird dieser betätigt, wird sofort ein Stoppbefehl an die Presse und die Thermostate geschickt. Hierauf wird der Versuch abgebrochen. Auch die aktuelle Druckkraft wird in einer Schleife mit der vorher eingegebenen zulässigen Kraft verglichen. Wird die Kraft größer als erlaubt (z. B. aufgrund von starkem Quellen der Probe), wird das Programm unterbrochen, und eine entsprechende Meldung erscheint.

Die Versuchsdauer für jeden einzelnen Versuchsschritt wird zu einem Startzeitpunkt addiert. Wird der Endzeitpunkt eines Schrittes erreicht, wird geprüft, ob ein weiterer Schritt gestartet werden soll, ansonsten stoppt die Datenaufzeichnung, die Thermostate schalten ab und die Heizplatte fährt aus dem Probenbehälter.

Beim Start von kraftgesteuerten Versuchen wird zuerst eine Durchströmung der oberen Heizplatte, die an der Kraftmessdose befestigt ist, durchgeführt. Dabei wird die Last der oberen Platte inklusive des Umlaufwassers des Thermostates und einer ggfs. vorhandenen Isolierung ermittelt. Der Wert wird als Startwert für alle weiteren aufzubringenden Laststufen verwendet.

Die aufgebrachten Spannungen führen zu Verformungen der Probe. Es können aber auch Umlagerungen der Bodenkörner, Setzungen oder Quellen auftreten. Dies kann dazu führen, dass die aufgebrachten Kräfte sich innerhalb eines Versuchsschrittes ändern. Das Gerät passt bei kraftgesteuerten Versuchen automatisch die Regelwerte an. Die Verformung lassen sich bei jeder Stufe über den Startweg zurückrechnen. Der weitere Versuchsablauf erfolgt analog zu den oben beschriebenen Schritten.

8.2.6 Validierung

8.2.6.1 Vergleichsmessungen mit verschiedenen Geräten

Zur Validierung der Messergebnisse unabhängig von Lockergesteinseigenschaft wie Korn-dichte, Kornverteilung und Wassergehalt wurden Vergleichsmessungen an trockenen natürlichen und künstlichen Festkörpern mit unterschiedlichen an der TU Darmstadt vorhandenen Geräten durchgeführt.

Hierzu wurden eingesetzt:

- Linienquellenverfahren (TK04)
- Optical Scanning Verfahren (Thermoscanner)
- Plattengerät (λ -Meter EP500e)

Die Proben sind zwei plangeschliffene Steinplatten (Gabbro mit den Hauptbestandteilen Anorthit, Augit und Hornblende und Granit mit den Hauptbestandteilen Feldspat, Quarz und Glimmer), eine Floatglas- und eine Plexiglasplatte (Abbildung 8.16).

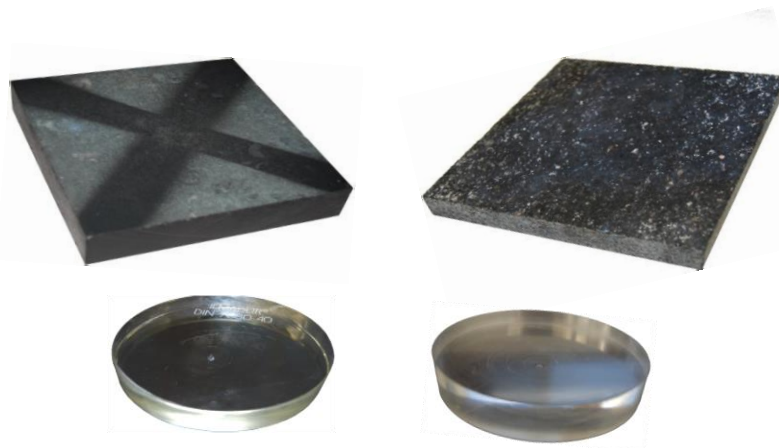


Abbildung 8.16: Plangeschliffene Kalibrierproben Gabbro, Granit, Floatglas und Plexiglas

Die Temperaturzeitreihe der Granituntersuchung ist beispielhaft in Abbildung 8.17 dargestellt, und die Auswertungen der Messergebnisse der vier Proben mit unterschiedlichen Messverfahren sind in Tabelle 8.6 gegenübergestellt. Die maximalen Abweichungen betragen 8,7 % bei der Plexiglasprobe. Bei der Floatglasprobe ergibt sich die kleinste Abweichung von 1 %. Es wurde für die Versuchsreihe eine Vergleichsplatte mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,94 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Plattenmittentemperatur verwendet.

Tabelle 8.6: Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit verschiedenen Messgeräten

Probe	Messwert neues WLF-Messgerät in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Vergleichsmesswert in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Vergleichsmessgerät	Max. Abweichung in %
Floatglas	1,12	1,13	TK04	1,0
Gabbro	2,34	2,39	λ -Meter EP500e	2,9
		2,30	Thermoscanner	
		2,41	TK04	
Granit	2,41	2,33	λ -Meter EP500e	3,2
Plexiglas	0,21	0,19	Herstellerangaben/Plattengerät	8,7

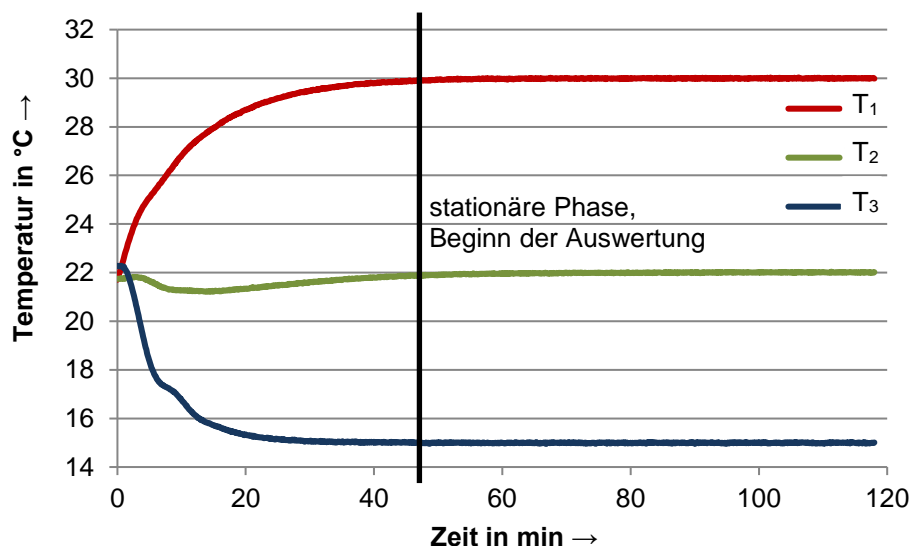


Abbildung 8.17: Zeitreihen der Temperaturen bei der Untersuchung einer Granitprobe

8.2.6.2 Untersuchung in Anlehnung an einen Ringversuch

Um die Praxistauglichkeit der Anlage und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu untersuchen, wurde das Gerät in zwei weiteren bodenmechanischen Labors in Anlehnung an einen Ringversuch getestet. Das Gerät, sowie die zu messenden Lockergesteinsproben wurden für die Messungen zur Verfügung gestellt. Teilgenommen an den Versuchen haben neben dem Hydrothermikum am Institut für Angewandte Geowissenschaften (an dem die Entwicklung des Gerätes erfolgte) das Institut und die Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt sowie das bodenmechanische Prüflabor des Instituts für Geotechnik an der TU Bergakademie Freiberg. Die Labors wurden aufgrund ihrer lang-

jährigen Erfahrung mit bodenmechanischen Untersuchungen ausgewählt. Der Schwerpunkt der Versuche und Auswertung liegt auf der Überprüfung und Weiterentwicklung der Handhabbarkeit und der Bestimmung der Randbedingungen beim Einbau, da sie die wichtigsten Einflussfaktoren für thermische Messungen an Lockergesteinsproben darstellen.

Als Proben wurden ein verwitterter Granodiorit (Bodenart: gS, ms, fg, fs') zur Messung von Proben mit einem breiten Spektrum an Korndurchmessern und ein Feinsand (Bodenart: fS, ms) zur Messung homogener Lockergesteinsproben eingebaut. Der Probeneinbau erfolgte jeweils durch einen Mitarbeiter der Prüflabore. Für jede Messreihe wurden die Proben neu in das Messgerät eingebaut und unterschiedliche Probenmassen verwendet. Die Messwerte sind in Abbildung 8.18 dargestellt.

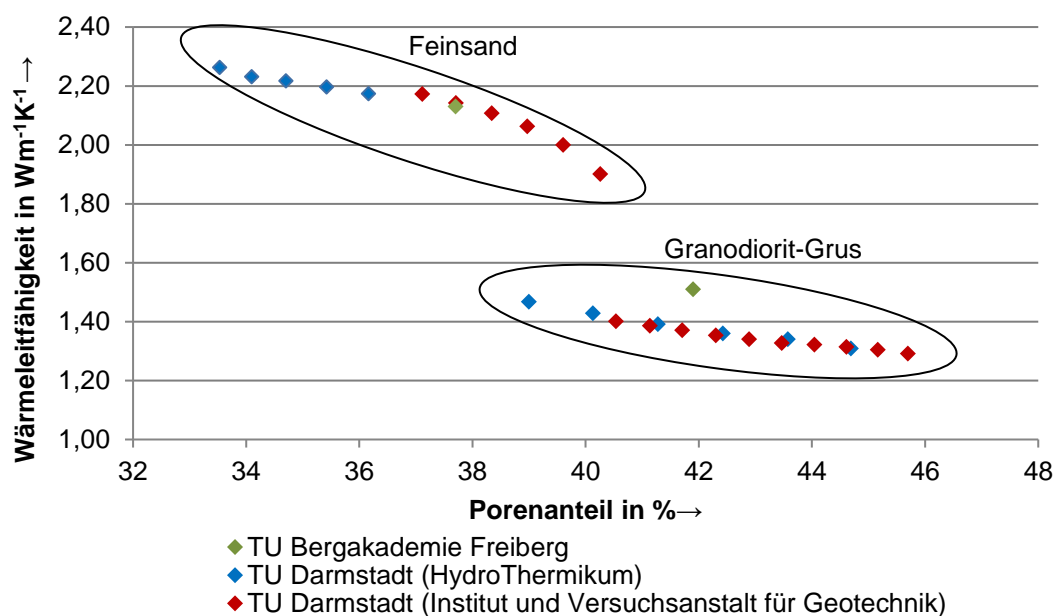


Abbildung 8.18: Messreihen an einem verwitterten Granodiorit-Grus und einer Feinsand Probe

Zu erkennen ist die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit der wassergesättigten Proben mit zunehmender Verdichtung. Die Abweichungen der Messwerte betragen beim Granodiorit-Grus 8 % und beim Feinsand weniger als 1 %. Die maximale Messabweichung von 8 % (Abb. 8.21, grün markiert) ist auf die unterschiedlichen Einbaumethoden in den Labors zurückzuführen. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist für Messungen an Lockergesteinen als gut zu bewerten. Maximale Abweichungen von 8 % sind auch bei anderen bodenmechanischen Versuchen regelmäßig zu beobachten.

8.2.7 Feuchteverteilung in der Probe aufgrund von Temperaturgradienten

In Taylor & Cavazza (1954) ist der Einfluss von Temperaturgradienten auf die Feuchteverteilung in Bodenproben beschrieben. Hierfür wurden auf zylindrische Bodenproben nach einer homogenen Wassersättigung für definierte Zeiträume Temperaturgradienten von 20 °C aufgebracht.

In Abbildung 8.19 sind die sich einstellenden Feuchteverteilungen für locker gelagerten und in Abbildung 8.20 für dichtgelagerten Lehm in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Der Ausgangswassergehalt beträgt 17,5 %. Die Zylinder wurden während der Temperierung horizontal gelagert. Für die gleichen Versuche an vertikal gelagerten Bodenproben mit der Heizplatte auf der Oberseite und der Kühlplatte auf der Unterseite ergibt sich zusätzlich eine Reduktion des Wasserdampfanteils in der Bodenluft an der kalten Platte um 13,9 % gegenüber den Versuchen in horizontaler Lagerung. Diese zeitabhängige Wasserbewegung in der Probe muss bei der Untersuchung von Böden berücksichtigt werden.

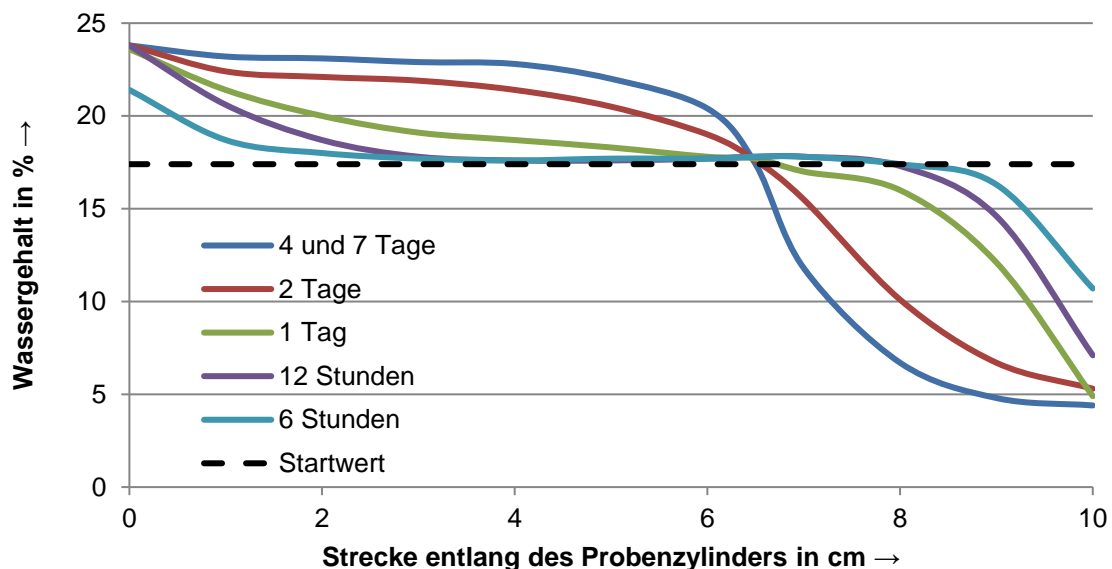


Abbildung 8.19: Feuchteverteilung in einer 10 cm hohen, locker gelagerten Lehmprobe nach Aufbringung eines Temperaturgradienten (Daten: Taylor & Cavazza, 1954)

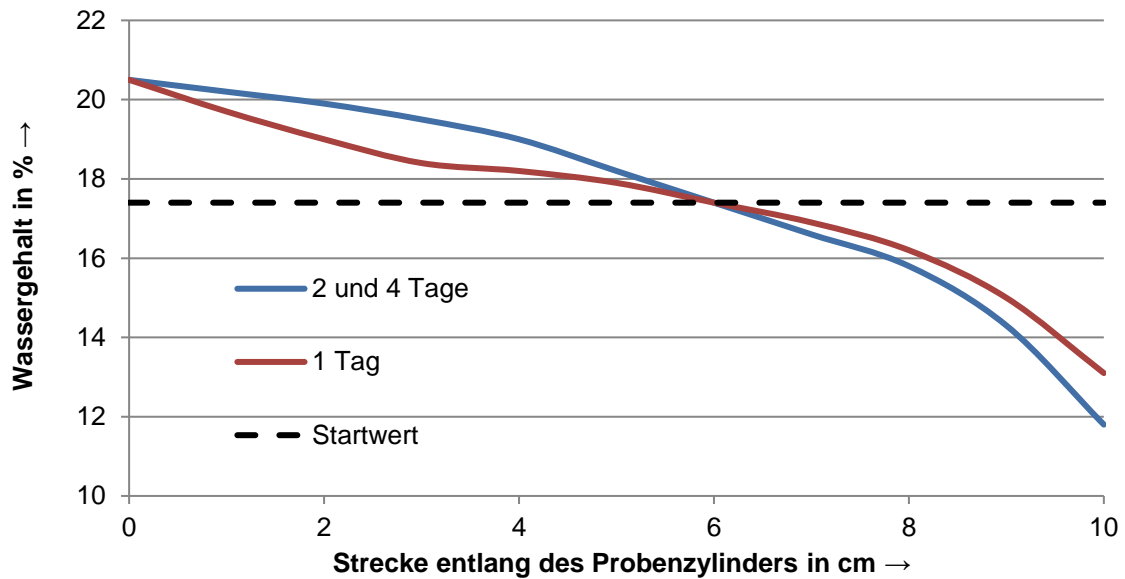


Abbildung 8.20: Feuchteverteilung in einer 10 cm hohen, dicht gelagerten Lehmprobe nach Aufbringung eines Temperaturgradienten (Daten: Taylor & Cavazza, 1954)

Ist während der Messung eine homogene Feuchteverteilung erwünscht, sollten deswegen Untersuchungen mit mehreren Stunden Dauer ohne zwischenzeitliche Homogenisierung der Bodenproben vermieden werden. In den meisten Fällen ist aber eine Untersuchung von Interesse, die die Veränderung der thermischen Eigenschaften und den zusätzlichen Wärmetransport über eine scheinbare Wärmeleitung über Dampf nach Abschnitt 3.3.2 einschließt. In der Umgebung von Erdkabeln treten diese Effekte bei entsprechenden Temperaturen ebenfalls auf. Diese Temperaturgradienten bewirken Feuchteverteilungen und Dampftransporte, die entsprechend im Messgerät nachgestellt werden können. Im Laufe des weiteren Testfeldbetriebes werden die Temperaturgradienten im Boden um Kabel für stationäre und instationäre Stromlasten untersucht. Diese werden dann im Gerät unter Auswertung der zugehörigen Wärmeleitfähigkeiten abgebildet.

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

9.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt eine Grundlage zur Ermittlung der bodenphysikalischen Kennwerte für die thermische Belastbarkeit von erdverlegten Kabelsystemen dar. Hierzu wurden einerseits Messverfahren entwickelt und zahlreiche Proben analysiert sowie andererseits die Erwärmung von Kabelsystemen in unterschiedlichen Bettungsbedingungen in einem Freilandversuch experimentell aufgezeichnet.

Es wurde eine Vorgehensweise zur Beprobung für die thermische Untersuchung von Böden entwickelt. Dazu wurden die Kennwerte für die Untersuchung unterschiedlicher Erdkabelbettungen (offshore, onshore, Sonderbauformen) ermittelt und Entnahme-, Lagerungs- und Transportkonzepte erstmals abgeleitet. Die vorgestellte Vorgehensweise wurde flächendeckend an den 39 Hauptbodenarten nach der Bodenkundlichen Übersichtskarte von Bayern BK 500 angewendet.

Die neuentwickelten Messverfahren unter Verwendung von Nadelsonden für Wärmeleitfähigkeitsmessungen nach dem Linienquellenverfahren ermöglichen die Messung der thermischen Eigenschaften von Böden und Baustoffen in Abhängigkeit der teilgesättigten Bodenkennwerte. Hierbei ist hervorzuheben, dass ein klassischer Verdunstungsversuch mit einer Wärmeleitfähigkeitsmessung mittels Nadelsonden kombiniert wurde. Mit dieser methodischen Weiterentwicklung kann die Wärmeleitfähigkeit einer Bodenprobe direkt über einen weiten Wassergehalts- und Saugspannungsbereich bestimmt werden, während das Wasser aus der Probe verdunstet. Zudem wurde ein neues Verfahren für die Überführung der einzelnen Messwerte in eine stetige Funktion abgeleitet.

Es werden die Ergebnisse von Messungen an 13 Rohstoffen für Bettungsbaustoffe dargestellt. Die Messung dieser Rohstoffe erfolgt als Suspension in einer flüssigen Phase. Anschließend erfolgt die Rückrechnung der Wärmeleitfähigkeiten der festen Bestandteile auf Basis des Modells des geometrischen Mittels. Zudem werden die Messergebnisse von 16 Seeböden aus der Nord- und Ostsee bei unterschiedlichen Lagerungsdichten dargestellt.

Das Versorgungsgebiet des Projektpartners, der E.ON AG, umfasst erhebliche Anteile Bayerns. Deshalb wurden insbesondere bayerische Böden untersucht. Es werden Ergebnisse der Beprobung der 39 Hauptbodenarten nach der Bodenkundlichen Übersichtskarte von Bayern gezeigt. Dabei wurden zunächst 14 Böden mit Hilfe von Rammsondierungen auf ihre natürliche Lagerungsdichte im Feld untersucht. Die untersuchten Böden lagen in

der Tiefe, in der Mittel- und Niederspannungskabel eingebaut werden (60 bis 70 cm), meist in einer lockeren bis mitteldichten Lagerung vor. Die Lagerungsdichte nimmt ab ca. 1,50 m Tiefe zumeist zu. Es werden die Untersuchungsergebnisse von vier Böden ausführlich vorgestellt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Anwendung des Wärmetransportmodells nach Campbell, das eine Bestimmung der Wärmeleitfähigkeits-Wassergehaltsbeziehung anhand einzelner Parameter erlaubt. Dies ermöglicht, wie an den Messwerten gezeigt wird, eine Rekonstruktion der kontinuierlichen Messkurven durch Bestimmung einzelner Messpunkte und kann zukünftig den messtechnischen Aufwand zur Bestimmung der Bodencharakteristika verringern.

Zudem werden die Messergebnisse für zwei für die Kabelverlegung bedingt geeignete Böden dargestellt. Diese sind Moorböden und anmoorige Böden. Die thermischen Eigenschaften von moorigen Böden hängen weitestgehend vom Anteil der organischen Bestandteile ab. Aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeiten organischer Bestandteile von weniger als $0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ sowie der schlechten Verdicht- und Befahrbarkeit sind diese Böden nur bedingt für den Trassenbau geeignet.

Die Übertragbarkeit der Labormesswerte auf die Belastbarkeit von Erdkabeln hängt von einer Vielzahl weiterer Faktoren ab. Hierzu gehören beispielsweise der Grundwasserflurabstand, eine mögliche Durchwurzelung, das Auftreten von Steinen innerhalb der Bodenmatrix, die Beschaffenheit der Bodenoberfläche sowie die beim Kabeleinbau erzielte Verdichtung des Bodens. Die Einflüsse dieser Faktoren werden mit Hilfe des Modells nach Campbell nachvollzogen.

Mittels statistischer Betrachtungen von Messergebnissen konnte das Potenzial der geothermischen Voruntersuchung von Verlegetrassen für die Berechnung der Kabelbelastbarkeit aufgezeigt werden. Hierfür wurden Ergebnisse aus der Untersuchung von zwanzig der sandigen, lehmigen und tonigen Böden, die die hauptrelevanten Bodenarten für Kabeltrassen in Bayern darstellen, ausgewertet. Die Werte stammen dabei aus dem Verdunstungsversuch, der die kontinuierliche Ermittlung der Wasserspannungskurve und die gleichzeitige Aufzeichnung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens erlaubt, sowie bei 16 weiteren Böden aus einzeln bestimmten Kennwerten. Diese waren u.a. die Wärmeleitfähigkeit bei Entnahmedichte und Entnahmewassergehalt beziehungsweise bei Entnahmedichte und Wassersättigung.

Bei den bayrischen Böden ergaben sich für 14 % der untersuchten Proben Wärmeleitfähigkeiten, die unter $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ liegen. Für diese Böden ist der oft bei Bemessungen der Übertragungsleistung nach DIN 0276-1000 angesetzte Bemessungswert von $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ zu

groß gewählt. Mit Bodenverdichtungsarbeiten im Bereich der Kabelgräben werden dagegen Wärmeleitfähigkeiten von mehr als $1,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreicht. Dieses konnte für mindestens 50 % der Böden gezeigt werden. Damit kann für Kabel in diesen Böden eine erhöhte Belastbarkeit nach DIN 0276-1000 für die Verteilung elektrischer Energie angesetzt werden.

Es wird gezeigt, dass eine Identifizierung von Böden mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten ebenso wie die Identifizierung von Böden mit hohen Wärmeleitfähigkeiten während des Trassenbaus möglich ist. Damit können Böden mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten gezielt ausgetauscht werden. Die Messergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden in einer hierfür erstellten GIS-Karte erfasst. Sie bildet mit den Messwerten der folgenden Projektabschnitte die Basis für die Entwicklung einer räumlichen Bewertungsmethode zur Planung von Kabeltrassen, welche den Einfluss des Energie- und Wasserhaushalts der Standorte berücksichtigt.

Bei konsequenter Weiterführung dieser Untersuchungen können Datensätze für flächendeckende Karten geschaffen werden. Die Stichpunktmessungen dieser Arbeit stellen eine Grundlage hierfür dar. Aussagen für große Areale können bei entsprechender Ausweitung der Datensätze getroffen werden.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Kabeltestfeld errichtet und Untersuchungen stationärer Temperaturzeitreihen von Mittel- und Niederspannungskabeln mit einem Aluminiumleiter mit einer Querschnittsfläche von 150 mm^2 durchgeführt. Diese sind in vier verschiedenen Böden (lehmig, tonig, sandig) und einem künstlichen Bettungsbaustoff verlegt. Anhand der Auswertung der Temperaturzeitreihen nach der Linienquellentheorie werden die Messergebnisse aus dem Labor validiert. Es zeigen sich gute Übereinstimmungen. Die Abweichungen lassen sich mit den Umgebungsbedingungen erklären. Die in-situ Messungen beinhalten alle Umwelteinflüsse, die in der Realität auf Kabeltrassen wirken, wie z. B. Verringerung von Kontaktwiderständen mit der Temperaturdehnung des Kabels und ein zusätzlicher konvektiver Wärmetransport im Porenraum über die Dampfphase mit steigender Temperatur. Die Labormesswerte wurden unter Ausschluss solcher Einflüsse generiert. Das dargestellte Auswertungsverfahren stellt eine Möglichkeit dar, bei neugebauten Trassen durch Anbringung von Temperatursensoren bzw. Lichtwellenleitern zur verteilten Temperaturmessung über eine Aufheizung des Kabels die Kennwerte des umgebenden Bodens zu ermitteln und zusätzlich Trassenbereiche mit besonders hoher Wärmeentwicklung zu identifizieren und möglicherweise zu sanieren.

Da bei Messungen mittels Nadelsonden kaum große Temperaturgradienten in die Probe eingebracht werden können, wurde ein Wärmeleitfähigkeitsmessgerät für Böden unter Variation der Verdichtung und der Temperaturgradienten entwickelt, wodurch der Dampftransport in der Probe miterfasst wird.

9.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelten Messgeräte und -verfahren sowie die vorgestellten Auswertemethoden und Untersuchungsergebnisse bieten eine breite Basis für die Ermittlung von Wärmeleitfähigkeiten von Erdkabelbettungen. Um ein anwendungsorientiertes Bewertungssystem für die thermischen Belastbarkeiten von Erdkabeln zu entwickeln, müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Die wichtigsten sind:

1. Die punktuell erfassten Bodenproben sollten um ausgewählte Messpunkte entlang von Kabeltrassen ergänzt werden, um ein Maß für die natürlich auftretende Varianz der Bodenkennwerte zu erhalten.
2. Zusätzlich müssen in Zukunft Messungen in Kabeltrassen und an Auffüllungen, die häufig innerstädtisch vorliegen, durchgeführt werden, um real vorhandene Verdichtungen und Durchwurzungen beurteilen zu können.
3. Die Umwelteinflüsse, wie die durch Durchwurzlung und Wetterbedingungen auftretende Saugspannungsverläufe sowie der Einfluss von Versiegelung der Bodenoberfläche, sollten durch Implementierung in eine Finite-Elemente-Modellierung und die Verknüpfung mit den gesammelten Bodenparametern weiter quantifiziert werden.
4. Der kombinierte Wärme- und Wasser(dampf)transport und die Austrocknung von Böden im Nahbereich der Kabel muss messtechnisch und in Finite-Elemente-Simulationen erfasst werden.

SYMBOLVERZEICHNIS

Das Verzeichnis umfasst die wichtigsten wiederkehrenden Symbole. Doppelbedeutungen von Symbolen sind möglich. Spezifische Bedeutungen und weitere Bezeichnungen sind im Text erläutert.

Lateinische Buchstaben

Kürzel	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Oberfläche
c_k	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
c_p	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$	volumetrische Wärmekapazität
D	m	Durchmesser
Ei	-	Exponential-Integral
E	N m^{-2}	Elastizitätsmodul
e	-	Porenzahl
f_1, f_2	-	Korrekturfaktoren nach DIN VDE 0276 Teil 1000
g	m s^{-2}	Erdbeschleunigung
g_a, g_b, g_c	-	Formfaktoren für die Kornform
h	m	Höhe
I	A	Stromstärke
i	-	hydraulischer Gradient
K	m^2	Permeabilität
k_f	m s^{-1}	Durchlässigkeitsbeiwert
l	m	Länge
m	kg	Masse
m	-	Transformationsparameter der van Genuchten-Funktion
n	-	Porenanteil, Steigungsparameter der van Genuchten- Funktion
P	W	Leistung
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{q}	W m^{-2}	Wärmestromdichte
R	Ω	elektrischer Widerstand
R'	Ωm^{-1}	elektrischer Widerstandsbelag
r	m	Radius
R_B	K W^{-1}	thermischer Übergangswiderstand
R_{th}	K W^{-1}	thermischer Widerstand

R'_{th}	$K\ m^{-1}\ W^{-1}$	thermischer Widerstandsbelag
$R_{th, spez}$	$K\ m\ W^{-1}$	spezifischer thermischer Widerstand
$R\uparrow, R\downarrow$	J	Strahlungsenergie
S_e	-	effektive Sättigung
S_r	-	Sättigungszahl
S_{Sa}	-	Salzgehalt
s, x	m	Strecke
T	°C oder K	Temperatur
t	s	Zeit
T_K	K	Temperatur
T_1	K	Geregelte Temperatur der Heizplatte
T_2	K	Temperatur in der Referenzplatte
T_3	K	Temperatur der Kühlplatte
U	J	innere Energie
V	m^3	Volumen
v	$m\ s^{-1}$	Relativgeschwindigkeit
V_k	m^3	Volumen der festen Einzelbestandteile
\dot{W}	W	Wärmequelle und -senke
w	-	gravimetrischer Wassergehalt

Griechische Buchstaben

Kürzel	Einheit	Bedeutung
α	m^{-1}	Skalierparameter der van Genuchten-Funktion
γ	-	Euler-Mascheroni-Konstante ($\gamma = 0,57722$)
ε	-	Dehnung
θ	-	Anteil
θ_r	-	Restwassergehalt nach der Entwässerung
θ_s	-	Sättigungswassergehalt
κ	$m^2\ s^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit / thermische Diffusivität
λ	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ρ	$kg\ m^{-3}$	Dichte
ρ_s	$kg\ m^{-3}$	Korndichte
σ	$N\ m^{-2}$	Spannung
ψ	$N\ m^{-2}$	Kapillarspannung

Fußzeiger

Kürzel	Bedeutung
a	Luft
da	trockene Bodenluft
d	trocken
eff	effektiv
K	Kabel
k	kurzwellig
l	langwellig
L	Leiter
m	mittlerer
Ma	Matrix
P	Probe
Po	Pore
S	Schirm
s	gesättigt / Korn
th	thermisch
V	Verlust / Vergleichsplatte
w	Wasser

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Aufbau des deutschen Stromnetzes (verändert nach VKU, 2012).....	5
Abbildung 2.2: Mittelspannungskabel NA2XS(F)2Y 1x150 RE/25 (verändert nach allkabel s.r.o., 2014).....	7
Abbildung 2.3: Niederspannungskabel NAY2Y-J SE 4x150 (allkabel s.r.o., 2014).....	9
Abbildung 2.4: Dreiphasensystem Boden (die relative Luftfeuchte in der Bodenluft beträgt in der Regel mehr als 95 %).....	17
Abbildung 2.5: Erscheinungsformen und Bezeichnungen von Wasser im Untergrund (verändert nach Zunker, 1930 und Hölting & Coldewey, 2013)	19
Abbildung 2.6: Zusammenhang der Teilpotenziale (verändert nach Hölting & Coldewey, 2013 und Blume et al., 2010)	21
Abbildung 2.7: Wasserspannungskurven typischer Böden in Abhängigkeit der Bodenart (verändert nach Blume et al., 2010)	22
Abbildung 2.8: Prinzipielle Darstellung der Wasserspannungskurve (nach Fairbridge & Finkl, 1979)	23
Abbildung 2.9: Hysterese des Wassergehaltes in einer Pore bei gleichen Saugspannungen aufgrund des Ink-bottle-effect (nach Marshall & Holmes, 1988)..	24
Abbildung 2.10: Ent- und Bewässerung einer Doppelkapillare mit $r_1 < r_3 < r_2$ (Vogler, 1999)	25
Abbildung 2.11: Relative Permeabilitäten des Porenraumes typischer Bodenarten in Abhängigkeit der Sättigung	28
Abbildung 2.12: Mögliche Verteilung der Strahlungskomponenten und Energiebilanz an der Bodenoberfläche (Daten aus Jury & Horton, 2004)	29
Abbildung 3.1: Thermisches Ersatzschaltbild für ein erdverlegtes Mittelspannungskabel	32
Abbildung 3.2: Anordnung von Mittelspannungskabeln im Boden.....	35
Abbildung 3.3: Erwärmung eines Dreierbündels von Mittelspannungskabeln in 70 cm Tiefe in Abhängigkeit des spezifischen Bodenwärmewiderstandes bei stationärer Bestromung	35
Abbildung 3.4: Standard-Lastprofil aus der Norm VDE 0276	37
Abbildung 3.5: TK 04 Messgerät (links), Halbraum- (rechts oben) und Vollraumsonden (rechts unten).....	40
Abbildung 3.6: Divided-Bar-Verfahren (verändert nach Pribnow & Sass, 1995)	42
Abbildung 3.7: Schematischer Aufbau des Thermoscanners (www.geo.tu-darmstadt.de)	43
Abbildung 3.8: Anlagerung von Reibungsmaterial durch Austrocknung (verändert nach Rigole & de Bisschop, 1972)	46
Abbildung 3.9: Wärmeleitfähigkeit von Wasser, wassergesättigter Bodenluft und Luft bei Atmosphärendruck (de Vries, 1963).....	49
Abbildung 4.1: Berechnete Wärmeleitfähigkeit von Wasser in Abhängigkeit von Salzgehalt und Temperatur	55
Abbildung 4.2: Händisch angelegter Schurf (Thoma, 2014)	59

Abbildung 4.3: Beprobungsareal mit vollständig abgeteufter Instrumentierungsbohrung (IB).....	60
Abbildung 4.4: Beprobungsareal mit vollständig abgeteufter Zugangsbohrung (ZB) und teilweise abgeteufter Beprobungsbohrung (BB)	61
Abbildung 4.5: Beprobungsareal mit vollständig abgeteufte Bohrungen und angelegtem Schurf, nach der Durchführung von Rammsondierungen.....	62
Abbildung 5.1: Schnitt durch den Messaufbau	65
Abbildung 5.2: Messbehälter mit einer Halbraumsonde im Boden (links), Messbehälteraufsatz (rechts oben), Filterstempel (rechts unten)	65
Abbildung 5.3: Säulenversuchsstand zur Bestimmung thermischer und hydraulischer Bodenkennwerte	67
Abbildung 5.4: Dielektrische Eigenschaften von Bodenbestandteilen über deren Dielektrizitätszahlen (Werte in Klammern, links) (Scheuermann et al., 2002), Bauarten von Frequenz-Domain-Reflectometry-Sensoren (rechts)	68
Abbildung 5.5: Anordnung der Sensoren in der Messebene (grau markiert: mittlere Einflussbereiche der Sonden) (Sass & Stegner, 2012).....	68
Abbildung 5.6: Messwerte und Kurvenanpassungen eines Mittelsandes Körnung 0/2	70
Abbildung 5.7: Verdunstungsversuch nach Schindler (1980), offenes Versuchsgerät (links), eingebaute Bodenprobe (rechts)	71
Abbildung 5.8: Saugspannungs- und Probengewichtszeitreihe eines Verdunstungsversuches (Sass & Stegner, 2010 nach Schindler, 1980).....	73
Abbildung 5.9: Ansicht und Schnitt durch das um eine Vollraumlinienquelle erweiterte Verdunstungsversuchsgerät	73
Abbildung 5.10: Wärmeleitfähigkeits- und Kapillarspannungszeitreihe eines Verdunstungsversuches an Granodiorit-Grus	74
Abbildung 6.1: Entnahmegebiete der Nord- und Ostseeböden	76
Abbildung 6.2: Gesättigte Wärmeleitfähigkeiten von Nord- (N1 bis N12) und Ostseeböden (O1 bis O4) in Abhängigkeit des Porenanteils.....	78
Abbildung 6.3: Modellabhängige Berechnungsergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit eines Quarzsand-Wassergemisches und Messwerte	79
Abbildung 6.4: Bodenproben bayerischer Böden; die Bezeichnungen entsprechen derjenigen in Tabelle 6.4.....	84
Abbildung 6.5: Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung bayerischer Böden	85
Abbildung 6.6: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Saugspannung bayerischer Böden	85
Abbildung 6.7: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 6 (SE)	88
Abbildung 6.8: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 12 (UM).....	88
Abbildung 6.9: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 26 (SU*).....	89
Abbildung 6.10: Beziehung zwischen Wärmeleitfähigkeit und Wassergehalt von Boden 29 (TA).....	89

Abbildung 6.11: Wärmeleitfähigkeit von Lehm-Organik-Gemischen in Abhängigkeit des Organikgehaltes.....	91
Abbildung 6.12: Wärmeleitfähigkeit von Hochmoortorf in Abhängigkeit von der Wassersättigung	92
Abbildung 6.13: Lehm Boden mit Muschelkalksteinen (bayerische Rhön, September 2014)	93
Abbildung 6.14: Verbreitung von Felsböden (lila und grün markiert) im Projektgebiet in Bayern	93
Abbildung 6.15: Messwerte der trockenen Wärmeleitfähigkeiten von Malmkalksteinen (Homuth, 2014)	94
Abbildung 6.16: Messwerte der Rohdichten von Malmkalksteinen (Homuth, 2014)	95
Abbildung 6.17: Messwerte der Korndichten von Malmkalksteinen (Homuth, 2014)	95
Abbildung 6.18: Boden 17 mit hohem Anteil an Schichtsilikaten (metallisch glänzende Partikel)	97
Abbildung 6.19: Spezifische Wärmekapazitäten von ofengetrockneten bayerischen Böden in Abhängigkeit der Temperatur	98
Abbildung 6.20: Spezifische Wärmekapazitäten von ofengetrockneten bayerischen Böden und der Testfeldböden Sand, Lehm und Ton in Abhängigkeit der Temperatur	98
Abbildung 6.21: Wärmekapazitäten bayerischer Böden bei 20°C in Abhängigkeit des Wassergehaltes	100
Abbildung 6.22: Übersicht über die Wärmeleitfähigkeiten der Bodenproben bei Entnahmewassergehalt und Entnahmedichte	101
Abbildung 6.23: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten unverdichteter bayerischer Böden in 60 cm Tiefe bei Saugspannungen von $p_F = 4,2$	102
Abbildung 6.24: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten verdichteter bayerischer Böden in 60 cm Tiefe bei Saugspannungen von $p_F 4,2$	103
Abbildung 6.25: Verteilung der Wärmeleitfähigkeiten verdichteter Böden in 60 cm Tiefe	104
Abbildung 7.1: Ansicht des Erdkabeltestfeldes mit den Bodenkassetten Ton, Sand, thermisch verbessertes Material (Flüssigboden) und Schluff bzw. Lehm	106
Abbildung 7.2: Einbau von Sensoren und Verdichtung einer Bodenlage (2013)	106
Abbildung 7.3: Flüssigbodenschalung und ausgehärteter Flüssigboden mit Polystyrolämmung (2013)	107
Abbildung 7.4: Fertiggestelltes Erdkabeltestfeld im Betrieb (2014)	107
Abbildung 7.5: Zeitreihen der Grundwasserstände in der direkten Umgebung des Erdkabeltestfeldes (Daten der Messstellen G4901 und G40631 der Hessenwasser GmbH)	108
Abbildung 7.6: Wärmeleitfähigkeiten der in den Testfeldkassetten eingebauten Böden in Abhängigkeit des Wassergehaltes	109
Abbildung 7.7: Wärmekapazität der in den Testfeldkassetten eingebauten Böden im ofengetrockneten Zustand	110
Abbildung 7.8: Wassergehalt der Testfeldböden in Abhängigkeit des p_F -Wertes	110
Abbildung 7.9: Elektrotechnischer Aufbau des Erdkabeltestfeldes	113

Abbildung 7.10: Thermisches Abbild eines Niederspannungskabels bei dreiphasiger (links) und vierphasiger (rechts) Bestromung mit jeweils 250 A (Janssen, 2014) ..	114
Abbildung 7.11: Temperaturen in Abhängigkeit der Stromlast (oben), Konversionsfaktor zwischen drei- bzw. vierphasiger Bestromung (unten) (Janssen, 2014)	114
Abbildung 7.12: Bodentemperaturen in 70 cm Tiefe im Sandfeld auf dem Erdkabeltestfeld über ein Jahr (Balzer et al., 2015)	116
Abbildung 7.13: Aufheizkurven Versuchsreihe am Mittelspannungskabel (Dreierbündel) im Grabenverbau	117
Abbildung 7.14: Aufheizkurven der zweiten Versuchsreihe am Niederspannungskabel	119
Abbildung 8.1: Gesamtansicht des Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes	124
Abbildung 8.2: Schematische Darstellung des Messverfahrens (Sass & Stegner, 2012)	125
Abbildung 8.3: Explosionszeichnung des Prüfeinsatzes	127
Abbildung 8.4: Schnitt durch den Prüfeinsatz	128
Abbildung 8.5: Probenbehälter mit Filterring und Entwässerungskanälen.....	128
Abbildung 8.6: Kalibrierbad für die Temperatursensoren	130
Abbildung 8.7: Prinzipielle Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften bei graphitgefüllten Kunststoffen (verändert nach Amesöder, 2007)	133
Abbildung 8.8: Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Ausrichtung eines Graphitfüllstoffes beim Spritzgießverfahren in einer Kunststoffplatte, Einspritzrichtung von rechts nach links (verändert nach Grundler et al., 2014)	134
Abbildung 8.9: Aufgesägte Kunststoff-Vergleichsplatten mit Spannungsrissen aufgrund zu schneller Abkühlung (Durchmesser 16 cm).....	135
Abbildung 8.10: Abschnitt einer stark inhomogenen (obere Hälfte) und inhomogenen (untere Hälfte) Polyphenylensulfid-Pressung (Länge 14 cm).....	135
Abbildung 8.11: Serienmessung aus 99 Einzelmessungen der Wärmeleitfähigkeit einer Kunststoff-Vergleichsplatte an Position 1	136
Abbildung 8.12: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit einer glasfaserdotierten PPS-Platte	137
Abbildung 8.13: Vergleichsplatte mit Führung zur Fixierung des Temperatursensors (Durchmesser 16 cm).....	138
Abbildung 8.14: Versuchsanordnungen zur Positionsbestimmung des Temperatursensors in der Vergleichsplatte	139
Abbildung 8.15: Abweichung bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit.....	141
Abbildung 8.16: Plangeschliffene Kalibrierproben Gabbro, Granit, Floatglas und Plexiglas	144
Abbildung 8.17: Zeitreihen der Temperaturen bei der Untersuchung einer Granitprobe	145
Abbildung 8.18: Messreihen an einem verwitterten Granodiorit-Grus und einer Feinsand Probe	146
Abbildung 8.19: Feuchteverteilung in einer 10 cm hohen, locker gelagerten Lehmprobe nach Aufbringung eines Temperaturgradienten (Daten: Taylor & Cavazza, 1954)	147
Abbildung 8.20: Feuchteverteilung in einer 10 cm hohen, dicht gelagerten Lehmprobe nach Aufbringung eines Temperaturgradienten (Daten: Taylor & Cavazza, 1954)	148

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Anteile von Freileitungen und Erdkabeln in deutschen Stromnetzen (Daten: Deutsche Umwelthilfe e.V., 2013; BDEW, 2010).....	6
Tabelle 2.2: Mathematische Beschreibung der Wasserspannungskurve (erweitert nach Vogler, 1999)	26
Tabelle 3.1: Kennwerte zur Berechnung der Kabelerwärmung	34
Tabelle 3.2: Randbedingungen für die Belastbarkeiten nach DIN VDE 0276	38
Tabelle 5.1: Parameter der Kurvenanpassungsfunktionen.....	70
Tabelle 6.1: Bodenkennwerte von Nordsee- (N1 bis N12) und Ostseeböden (O1 bis O4)	77
Tabelle 6.2: Wärmeleitfähigkeiten von Rohstoffen für Bettungsbaustoffe.....	81
Tabelle 6.3: Hauptbodenarten nach der Bayerischen Bodenkundlichen Karte BK 500 ...	82
Tabelle 6.4: Geotechnische Kennwerte von Bodenproben aus Bayern.....	83
Tabelle 6.5: Messwerte einer bayerischen Niedermoorprobe (Boden 35)	92
Tabelle 6.6: Wärmekapazitäten verschiedener Bodenbestandteile (Daten: Bachmann, 2005)	99
Tabelle 7.1: Kapillare Steighöhen in verschiedenen Bodenarten (Wolkersdorfer, 2008).....	108
Tabelle 7.2: Bodenkennwerte des in den Testfeldkassetten eingebauten Tones und Lehms.....	111
Tabelle 7.3: Bodenkennwerte des in den Testfeldkassetten eingebauten Sandes	111
Tabelle 7.4: Homogenität von Ton und Lehm	111
Tabelle 7.5: Messdaten der Aufheizungen des Mittelspannungskabelbündels.....	117
Tabelle 7.6: Anhand von Aufheizkurven des Mittelspannungskabelbündels berechnete Bodenkennwerte.....	118
Tabelle 7.7: Anhand von Aufheizkurven des Mittelspannungskabelbündels berechnete Bodenkennwerte.....	118
Tabelle 7.8: Messdaten der Aufheizungen des Niederspannungskabels	118
Tabelle 7.9: Anhand von Aufheizkurven der Niederspannungskabel berechnete Bodenkennwerte.....	119
Tabelle 7.10: Anhand von Aufheizkurven der Niederspannungskabel berechnete Bodenkennwerte.....	119
Tabelle 7.11: Vergleich von Labor- und Feldmesswerten der Wärmeleitfähigkeiten	120
Tabelle 8.1: Einordnung von Wärmeleitfähigkeitsmessgeräten und -verfahren.....	122
Tabelle 8.2: Bewertung der bewerteten Wärmeleitfähigkeitsmessgeräte	123
Tabelle 8.3: Wärmeleitfähigkeit der Kunststoff-Vergleichsplatte.....	136
Tabelle 8.4: Ergebnisse und Abweichungen der Positionsmessung des PT100	140

Tabelle 8.5: Randbedingungen für die Fehlerrechnung	141
Tabelle 8.6: Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit verschiedenen Messgeräten...	145

LITERATURVERZEICHNIS

Abu-Hamdeh, N. H.; Reeder, R. C. (2000): Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1285-1290.

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Hannover.

Ad-hoc-AG Boden (1999): Verknüpfungsregel 1.18. URL:

http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Netzwerke/Adhocag/Downloads/Ergaenzung_sregel_1_18.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Geprüft: 10.12.2014.

Ahuja, L.R.; Schwarzendruber, D. (1972): An improved form of the soil-water diffusivity function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 36(1): 9-14.

Allkabel s.r.o. (2014): Allkabel kabelové centrum. URL: <http://www.allkabel.cz/de/>. Geprüft: 10.12.2014.

Albrecht, Fritz (1949): Die Weiterentwicklung der Meßtechnik des Wassergehalts des Bodens auf thermischer Grundlage, *Theoretical and Applied Climatology*, 1(2): 149-155.

Alexiades, V.; Solomon, A.D. (1993): *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.

Amesöder, S.; Ehrenstein, G.W. (2007): Gerichteter Wärmetransport - eine besondere Bedeutung im Thermal Management, *Proc.: Wärmeleitende Kunststoffe, LKT*, Erlangen.

Anbergen, H. (2014): Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

ASTM D5334 (2008): Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure.

Averjanov, S.F. (1950): About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation, *Engineering Collection (in Russian)*, 7: 19-21.

Bachmann, J. (2005): Thermisches Verhalten der Böden, Kap. 2.6.4., In: Blume, H.P., P. Felix-Henningsen, W.R. Fischer, H.-G. Frede, R. Horn und K. Stahr (Hrsg.). *Handbuch der Bodenkunde*, 22. Erg. Lfg. 8/0532 S. Ecomed Verlag, Landsberg/Lech.

- Bachmann, J. (1997): Wärmefluß und Wärmehaushalt, Kap.2.7.5., In: Blume, H.P., P. Felix- Henningsen, W.R. Fischer, H.-G. Frede, R. Horn und K. Stahr (Hrsg.). Handbuch der Bodenkunde, 3. Erg. Lfg. 11/97, Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg/Lech.
- Balzer, C.; Hinrichsen, V. (2015a): Wirkleistungsverluste in einem Kabelsystem der Mittel- und Niederspannung - Anlagen zum Projektabschlussbericht, Projektphase 1: Heat Dissipation of Underground Cables, Technische Universität Darmstadt.
- Balzer, C.; Hinrichsen, V. (2015b): Beziehungen der stationären thermischen Belastbarkeit eines Kabelsystems - Anlagen zum Projektabschlussbericht, Projektphase 1: Heat Dissipation of Underground Cables, Technische Universität Darmstadt.
- Balzer, C.; Hinrichsen, V.; Drefke, C.; Stegner, J.; Hentschel, K.; Dietrich, J. (2015): Ampacity rating of directly buried distribution cables under the consideration of soil properties to improve efficiency of distribution networks. Proc.: 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon.
- Bär, K. (2012): Untersuchung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Bastian, P.; Bumiller, H.; Burgmaier, M.; Eichler, W.; Feustel, B.; Käppel, T.; Klee, W.; Manderla, O.; Reichmann, J.; Schwarz, K.; Tkotz, U.; Winter, U.; Ziegler, K. (2012): Fachkunde Elektrotechnik, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten.
- BDEW-Jahresstatistik (2010): Stromnetzbetrieb (HöS); veröff. Angaben der Netzbetreiber gem, StromNEV.
- Becher, H. H. (2014): Wasserbindung und Porengrößenverteilung, Handbuch der Bodenkunde, 2.3: 1-54.
- Beck, A. E. (1957): A steady state method for the rapid measurement of the thermal conductivity of rocks: J. Sci. Instr., 34: 186-189.
- Benfield, A.E. (1939): The Terrestrial Heat Flow in Great Britain, Proc.: Roy. Soc., A, London, 173(955): 428-450.
- Bierer, M. R. (1995): Temperaturschwingungen zur Bestimmung von Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringkoeffizient nicht durchströmter Schüttungen, Fortschr.-Ber. VDI, Düsseldorf.
- Blackwell, J.H. (1954): A transient flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk, J. Appl. Phys., 25: 137-144.

- Blume, H.-P.; Brümmer, G. W.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.; Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Aufl., Spektrum-Springer, Heidelberg.
- Bodzenta, J. (2008): Thermal wave methods in investigation of thermal properties of solids, The European Physical Journal Special Topics, 154: 305-311.
- Brakelmann, H. (1985): Belastbarkeiten der Energiekabel - Berechnungsmethoden und Parameteranalysen, VDE-Verlag, Berlin.
- Brakelmann, H.; Böing, R.; Dietrich, J.; May, H.-P. (2011): Powercrete® und CableCem® - Technische und wirtschaftliche Perspektiven, ew, 15: 64-71.
- Brakelmann, H.; Stammen, J.; Uhlenküken, H. (2013): Hotspotbereiche in Kabeltrassen, ew, 16: 39-43.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T. (1964): Hydraulic properties of porous media, Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins.
- Brutsaert, W. (1968): The permeability of a porous medium determined from certain probability laws for pore size distribution, Water Resources Research, 4(2): 425-434.
- Brugg GmbH (2009): Technische Informationen MS/NS-Kabel, URL: http://www.bruggcables.com/domains/bruggcables_com/data/free_docs/Technische%20Infos.pdf. Geprüft: 10.12.2014.
- Buckingham, E. (1904): Contributions to our knowledge of the aeration of soils. Bulletin 25. USDA Bureau of Soils, Washington, DC.
- Busch, K.F.; Luckner, L.; Tiemer, K. (1993): Lehrbuch der Hydrogeologie: Geohydraulik, 3. neubearbeitete Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Campbell, G. S. (1974): A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, Soil Science, 117: 311-314.
- Campbell, G.; Jungbauer, Jr.; Bidlake, W.; Hungerford, R. (1994): Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity, Soil Science, 158: 307-313.
- Childs, E.C. (1969): An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena. Wiley-Interscience, London.
- Clauser, C.; Schellschmidt R.; Nover G. (2002): Strukturelle, advective und paläoklimatische Einflüsse auf den Wärmetransport in der kristallinen Oberkruste am Beispiel der Kola-Halbinsel (Russland), Zwischenbericht für den Zeitraum 1. 1. 1998 - 31. 12. 2001, RWTH Aachen.

Côté, J.; Konrad, J.-M. (2006): Estimating the Thermal Conductivity of Pavement Granular Materials and Subgrade Soils. Transportation Research Record, 1967:10-19.

Côté, J.; Konrad, J.-M. (2005): A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials, Can. Geotech. J., 42: 443-458.

DCA (2015): Technische Richtlinien des DCA, Informationen und Empfehlungen für Planung, Bau und Dokumentation von HDD-Projekten, Aachen.

DE 102010036992 A1 (2010): Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit einer Messprobe, Buss, A.; Sass, I.; Seehaus, R.; Stegner, J. (Erfinder), angemeldet durch die Technische Universität Darmstadt, Deutsches Patentamt.

Dehner, U.; Müller, U.; Schneider, J. (2007): Planungsgrundlagen für die Nutzung von Erdwärmekollektoren - GeoBerichte 5., Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Hannover.

Deutsche Energie Agentur (2012): dena-Verteilnetzstudie - Ausbau und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030, URL: http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Energiesysteme/Dokumente/denaVNS_Abschlussbericht.pdf.
Geprüft: 10.12.2014.

De Vries, D.A. (1963): Thermal properties of soil, in W.R. Van Wijk (ed.), Physics of plant environment, North Holland Pub. Co., Amsterdam, 210-235.

D'Hollander, E.H. (1979): Estimation of pore size distribution from the moisture characteristic. Water Resources Research, 15(1): 107-112.

DIN 4094-3 (2002): Baugrund - Felduntersuchungen - Teil 3: Rammsondierungen, Beuth, Berlin.

DIN 18125 (2010): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 1: Laborversuche, Beuth, Berlin.

DIN 18127 (2012): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch, Beuth, Berlin.

DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Beuth, Berlin.

DIN EN 12620 (2008): Gesteinskörnung für Beton, Beuth, Berlin.

DIN EN 60228 (2005): Leiter für Kabel und isolierte Leitungen, Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 9001 (2008): Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen, Beuth, Berlin.

- DIN ISO 10381-1 (2003): Bodenbeschaffenheit - Probenahme - Teil 1: Anleitung zur Aufstellung von Probenahmeprogrammen, Beuth, Berlin.
- DIN ISO 10381-2 (2003): Bodenbeschaffenheit - Probenahme - Teil 2: Anleitung für Probenahmeverfahren, Beuth, Berlin.
- DIN ISO 10381-3 (2002): Bodenbeschaffenheit - Probenahme - Teil 3: Anleitung zur Sicherheit, Beuth, Berlin.
- DIN ISO 10381-4 (2004): Bodenbeschaffenheit - Probenahme - Teil 4: Anleitung für das Vorgehen bei der Untersuchung von natürlichen, naturnahen und Kulturstandorten, Beuth, Berlin.
- DIN VDE 0276-603 (2010): Starkstromkabel - Energieverteilungskabel mit Nennspannung 0,6/1,0 kV, Beuth, Berlin.
- DIN VDE 0276-620 (2010): Starkstromkabel - Energieverteilungskabel mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen von 3,6 / 36 (42) kV, Beuth, Berlin.
- DIN VDE 0298-2 (1990): Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen; Empfohlene Strombelastbarkeiten für Kabel mit Nennspannungen U₀/U bis 18/30 kV, Beuth, Berlin.
- DIN VDE 0276-1000 (1995): Starkstromkabel - Strombelastbarkeit, Allgemeines Umrechnungsfaktoren, Beuth, Berlin.
- DKD-R 5-1 (2003): Richtlinie - Kalibrierung von Widerstandsthermometern, DAkkS, Berlin.
- Drefke, C. (2012): Untersuchung der thermischen und hydraulischen Eigenschaften von Lockergesteinen, Unveröff. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, Water Resour. Res., 30: 211–233.
- Durner, W. (1991): Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden, Bayreuther Bodenkundliche Berichte, 20.
- Eberhardt, M. (2015): Untersuchung der geotechnischen und thermischen Eigenschaften byrischer Böden unter der Berücksichtigung der organischen Bestandteile im Bereiche erdverlegter Mittel- und Niederspannungskabel. Unveröff. Bachelorarbeit, TU Darmstadt.
- ECOFYS (2012): Abschätzung der Bedeutung des Einspeisemanagements nach § 11 EEG und § 13 Abs. 2., EnWG Bundesverband Windenergie e.V., URL: <http://www.ecofys.com/files/files/ecofys-2012-abschaetzung-einspeisemanagement.pdf>. Geprüft: 25.09.2013.

Eklöf, C.; Gehlin, S. (1996): TEF – a mobile equipment für thermal response test, MSc Thesis, Lulea university of Technology.

EN 12667 (2001): Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand, Beuth, Berlin.

EP2607892 (2011): Method for determining the thermal and temperature conductivity of a sample, Buss, A.; Sass, I.; Seehaus, R.; Stegner, J. (Erfinder), angemeldet durch die Technische Universität Darmstadt, Europäisches Patentamt.

EP2603789 (2011): Method and device for determining thermal conductivity and thermal diffusivity of a measurement sample, Buss, A.; Sass, I.; Seehaus, R.; Stegner, J. (Erfinder) angemeldet durch die Technische Universität Darmstadt, Europäisches Patentamt.

Erbas, K. (2001): Eine universelle Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit aus Aufheizkurven konstant geheizter Zylinderquellen, Dissertation, Technische Universität Berlin.

Eskilson, P. (1987): Thermal analysis of heat extraction boreholes, PhD Thesis, Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden.

Fairbridge, R. W.; Finkl, C. W. (1979): The Encyclopedia of Soil Science, Part 1, Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg.

Feng, C.L.; Browning, G.M. (1964): Aggregate stability in relation to pore size distribution, Soil Sci. Soc. Am. J, 11: 67-73.

Farouki, O. (1986): Thermal properties of soils, Trans Tech Publ., Clausthal-Zellerfeld.

Farrel, D.A.; Larson, W.E. (1972): Modeling the pore structure of porous media, Water Resources Research, 8(3): 699-706.

Freitas D. S.; A. T. Prata; A. J. de Lima (1996): Thermal performance of underground power cable with constant and cyclic currents in presence of moisture migration in the surrounding soil, IEEE Transactions on Power Delivery, 11(3): 1159-1170.

Fritz, W.; Diemke H. (1940): Die Wärmeleitfähigkeit von natürlicher Steinkohle und Koks, Springer in Komm., Berlin.

Geiger, R. (1961): Klima der bodennahen Luftschicht, Vieweg, Braunschweig.

Gemant, A. (1952): How to compute thermal soil conductivities, Heating, Piping and Air Conditioning, 24(1): 122-123.

- Grundler, M.; Reich, T.; Derieth, T.; Heinzl, A. (2014): Entwicklung von hochwärmeleitfähigen Polymer-Compounds, Proc.: 15. Problemseminar Polymermischungen, Halle (Saale).
- Gustafsson, S.E.; Karawacki, E.; Khan, M.N. (1983): Transient hot-strip method for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids, Journal of Physics D: Applied Physics, 12(9): 1411-1421.
- Hammerschmidt, U.; Meier, V. (2006): New Transient Hot-Bridge Sensor to Measure Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Volumetric Specific Heat. International Journal of Thermophysics, 27(3): 840-865.
- DE 10 2004 022206A1 (2005): Sensor und Sensoranordnung zur Messung der Wärmeleitfähigkeit einer Probe, Hammerschmidt, U.; Meier, V. (Erfinder), Deutsches Patentamt.
- Hartge, K.H.; Horn, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik, Schweizerbart, Stuttgart.
- Hashin, Z.; Shtrikman, S. (1962): A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials, J. Appl. Phys., 1962(33): 3125-3131.
- Haynes, W.M. (2010): CRC Handbook of Chemistry and Physics, 91. Auflage, Boca Raton.
- Heinhold, L.; Stubbe, R. (1999): Kabel und Leitung für Starkstrom, Publicis Publishing, Erlangen.
- Hölting, B.; Coldewey, G. (2013): Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart.
- Homuth, S. (2014): Aufschlussanalogstudie zur Charakterisierung oberjurassischer geothermischer Karbonatreservoirs im Molassebecken, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Hopmans, J.W.; Dane, J.H. (1986): Thermal conductivity of two porous media as a function of water content, temperature, and density, Soil Science, 142: 187-195.
- Huber, H. (2013): Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Wärmetransportverhalten oberflächennaher, durchströmter Böden, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- IEC 60287-1-1 (2006): Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General, IEC Central Office, Genf, Schweiz.
- IEC 60287-2-1 (2006): Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2-1: Thermal resistance - Calculation of thermal resistance, Amendment 2, IEC Central Office, Genf, Schweiz.

- Irmay, S. (1954): On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Trans. AGU, 35: 463-467.
- Janssen, H. (2014): Thermische Bewertung von Kabeln bei netzunüblicher Bestromung, Persönliche Mitteilungen zum Forschungsprojekt „Heat Dissipation of Underground Cables“, 28.03.2014, Fachgebiet Hochspannungstechnik, Technische Universität Darmstadt.
- Jones, F. W.; Pascal, F. (1993): Numerical-Simulation of Divided-Bar Thermal-Conductivity Measurements. In: *Studia Geophysica Et Geodaetica*, 37(3): 234–257.
- Jurnik, A. (1986): Übersicht der in Betracht kommenden Messmethoden zur Ermittlung des thermischen Verhaltens der Baustoffe, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Johansen, O. (1975): Thermal conductivity of soils, Ph.D. thesis, Trondheim, Norway. (CRREL Draft Translation 637, 1977).
- Jury, W. A.; Horton, R. (2004): *Soil Physics*, John Wiley & Sons, New York.
- Kern GmbH (2014): Technische Kunststoffteile, URL: <http://www.kern.de>. Geprüft: 14.09.2015.
- Kersten, M.S. (1949): Thermal properties of soil, Bulletin 28, Engineering Experiment Station, University of Minnesota.
- King, L.G. (1965): Description of soil characteristics for partially saturated flow, *Soil Sci. Soc. J.*, 29(4): 359-362.
- Koopmans, G., van de Wiel, G. M. L.; van Loon, L. J. M.; Palland, C. L. (1989): Soil physical route survey and cable thermal design procedure, *IEE Proceedings, Part C*, 136(6): 341-346.
- Kowalew, W. (2012): Errichtung einer Versuchsanlage für einen Feldtest verschiedener Erdwärmesondentypen, Unveröff. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- Krischer, O. (1934): Der Einfluss von Feuchtigkeit, Körnung und Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit körniger Stoffe: Die Leitfähigkeit des Erdbodens, Oldenbourg, München.
- Kristiansen J.I. (1982): The transient cylindrical probe method for determination of thermal parameters of earth material. *GeoSkripter 18*, Laboratory of Geophysics, Aarhus, Denmark.
- Küchler, A. (2009): *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*, 3. Auflage, Springer, Heidelberg.
- Laliberte, G.E. (1969): A mathematical function for describing capillary pressure-desaturation data, *BuH. Int. Ass. Sei. Hydrol.*, 14(2): 131-149.

Laures, W. (2010): Untersuchung zum Einsatz von Höchstspannungskabeln großer Länge in der 400 kV Ebene, Dissertation, Universität Duisburg-Essen.

Lee, K.Y.; Yang, J.S.; Choi, Y.S.; Park, D.H. (2006): Specific Heat and Thermal Conductivity Measurement of XLPE Insulator and Semiconducting Materials, KIEE Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 55(1): 6.

Lippmann, E.; Rauen, A. (2009): Measurements of Thermal Conductivity (TC) and Thermal Diffusivity (TD) by the Optical Scanning Technology, TCS TC Manual- Lippmann and Rauen GbR, Schaufling.

Lister, C. B. R. (1979): The pulse-probe method of conductivity measurement, Geophys. J. R. astr. Soc., 57: 451-461.

Lu, S. (2007): An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature, Soil Sci. Soc. J., 71(1): 8-14.

Lücking, H.W. (1981): Energiekabeltechnik, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.

Marshall, T. J.; Holmes, J. W. (1988): Soil Physics - 2nd ed., Cambridge Univ. Press, New York.

McGaw, R. (1969): Heat conduction in saturated granular materials. In: Effects of Temperature and Heat on Engineering Behavior of Soils, Highway Research Board Special Report, 103: 114-131.

Merck, T. (2006): Herleitung des 2 K – Kriteriums für die Bewertung der Bodenerwärmung, Bundesamt für Naturschutz, URL: http://typo3.dena.de/fileadmin/offshore/documents/StAOWind_Workshops/Kabel_in_Schutzgebieten/Kabel_in_Schutzgebieten_Vortrag_Merck.pdf. Geprüft: 13.08.2014.

Millar, R. J.; M. Lethonen (2002): The effect of moisture migration, native soil environment and trough cement quality on the steady-state rating of HV power cables. Tesla Report Nr. 66/2002, Helsinki University of Technology.

Miller, E. E.; Miller, R. D. (1956): Physical flow for capillary flow phenomena. Journal of Applied Physics, 27(4): 324-332.

Mickley, A.S. (1951): The thermal conductivity of moist soil, American Institute of Electrical Engineers Transaction, 70: 1789-1797.

Model, R.; Stosch, R.; Hammerschmidt, U. (2007): Virtual Experiment Design for the Transient Hot-Bridge Sensor. International Journal of Thermophysics, 28(5): 1447-1460.

- Montenegro, H. (1994): Parameterbestimmung und Modellierung der Wasserbewegung in heterogenen Böden. VDI Fortschritts-Berichte, 134, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Moore, T.F.; Slobod, R.L. (1956): The Effect of Viscosity and Capillarity on the Displacement of Oil by Water, *Producers Monthly*, 20:20-30.
- Mottaghy, D; Rath, V. (2006): Latent heat effects in subsurface heat transport modelling and their impact on palaeotemperature reconstructions, *Geophysical Journal International*, 164, 236-245.
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3): 513–522.
- Nguyen, D.T. (2010): Weiterentwicklung und Test eines Wärmeleitfähigkeitsmessgerätes für Lockergesteine, Unveröff. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- Oeding, D.; Oswald, B.R. (2011): *Elektrische Kraftwerke und Netze*, 7. Auflage, Springer, Heidelberg.
- Ozbek, H.; Philipps, L. (1980): Thermal conductivity of aqueous NaCl solutions from 20°C to 330°C, *J. Chem. Eng. Data*, 25: 263-267.
- Pokojski, M.; Westermann, D. (2011): Stromübertragung für den Klimaschutz - Potentiale und Perspektiven einer Kombination von Infrastrukturen URL: <http://www.vde.com/de/verband/pressecenter/pressemappen/documents/stromuebertragung/2011-05-12%20pres-sekonferenz.pdf>. Geprüft: 15.12.2014.
- Popov, Y. A.; Pribnow, D. F. C.; Sass, J. H.; Williams, C. F.; Burkhardt, H. (1999): Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning, *Geothermics*, 28(2): 253-276.
- Pribnow, D.F.C.; Sass, J.H. (1995): Determination of thermal conductivity for deep boreholes, *H. Geophys. Res.*, 100: 9981-9994.
- Priesack, E.; Durner, W. (2006): Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function. *Vadose Zone J.*, 5: 121-124.
- Rashidian, S. (2010): Untersuchungen der thermophysikalischen Eigenschaften von HINTERFÜLL-BAUSTOFFEN FÜR ERDWÄRMESONDEN, Unveröff. Vertieferarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- Reiter, M.; Hartmann H. (1971): A new steady-state method for determining thermal conductivity, *Journal of Geophysical Research*, 76(29): 7047–7051.

- Rigole, W.; de Bisschop, F. (1972): The formation of adhesive links between granular particles by means of emulsion, de Boodt, M. (Hrsg.): Proc. Symposium on the Fundamentals of Soil Conditioning, Ghent, 938-954.
- Rogowski, A.S. (1971): Watershed physics: Model of the soil moisture characteristic, Water Resources research, 7(6): 1575-1582.
- Salomone, L.A.; Kovacs, W.D.; Kusuda, T. (1984): Thermal performance of fine-grained soils. Journal of Geotechnical Engineering, 110(3): 359-374.
- Sanner, B. (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen - Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, Freiburg.
- Sanner, B.; Reuß, M.; Mands, E. (1999): Thermal Response Test – eine Methode zur in-situ-Bestimmung wichtiger thermischer Eigenschaften bei Erdwärmesonden, Geothermische Energie 24/25: 29-33.
- Sass, I. (2007): Ingenieurgeologie I - Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Darmstadt.
- Sass, I.; Brehm, D.; Coldewey, W.G.; Dietrich, J.; Klein, R.; Kellner, T.; Kirschbaum, B.; Lehr, C.; Marek, A.; Mielke, P.; Müller, L.; Panteleit, B.; Pohl, S.; Porada, J.; Schiessl, S.; Wedewardt, M.; Wesche, D. (2015a): Empfehlung Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie, Ernst & Sohn, Berlin.
- Sass, I., Hinrichsen, V., Stegner, J., Drefke, C., Balzer, C. (2015b): Heat Dissipation of Underground Cables - Quantifizierung des Einflusses des Wasserhaushalts, der Umwelttemperatur und der geothermischen Kennwerte auf die Wärmeableitung erdverlegter Mittel- und Niederspannungskabel, Abschlussbericht Projektphase 1, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Sass, I.; Lehr, C. (2011): Improvements on the Thermal Response Test Evaluation Applying the Cylinder Source Theory, Proc.: 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University 2011, SGP-TR-194, Stanford, CA.
- Sass, I.; Stegner, J. (2012): Coupled Measurements of Thermophysical and Hydraulic Properties of Unsaturated and Unconsolidated Rocks, Proc.: 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University 2012, SGP-TR-194, Stanford, CA.
- Sass, J. H.; Stone, C.; Munroe, R. J. (1984): Thermal conductivity determinations on solid rock - a comparison between a steady-state divided-bar apparatus and a commercial transient line-source device, J. Volcanol. Geotherm. Research, 20: 145-153.

Scheuermann, A.; Schlaeger, S.; Becker, R.; Schädel, W.; Schuhmann, R. (2002): Nutzen der TDR-Messtechnik zur Beurteilung ungesättigter Böden in der Geotechnik. BAW-Kolloquium: Der Einfluss von Lufteinschlüssen auf die Strömungs- und Druckdynamik in Erdbauwerken, Karlsruhe, Universität Karlsruhe.

Schindler, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben, Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd., 24(1): 1-7.

Schindler, U.; Durner, W.; von Unold, G.; Müller, L. (2010): Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range, Soil Sci. Soc. Am. J., 74(4): 1071-1083.

Schubert, K.O. (2014): Analytische Bestimmung bodenphysikalischer Kennwerte an Aufheizkurven von erdverlegten Stromkabeln, Unveröff. Masterarbeit, Technische Universität Darmstadt.

Simmons, C.S.; Nielsen, D.R.; Biggar J.W. (1979): Scaling of field-measured soil-water properties, Hilgardia, 47: 74-154.

Slack, G.A. (1980): Thermal conductivity of ice, Physical Review B, 22, 3065-3071.

Speck, D. (1994): Energiekabel im EVU, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim.

Starr, J. L.; Paltinanu, I. C. (2002): Methods for measurement of soil water content. Capacitance Devices, Dane, J.H. (ed.): Physical methods, 463-474.

Stegner, J.; Drefke, C.; Hentschel, K.; Sass, I. (2013): Quantifizierung der Wärmeableitung bei erdverlegten Mittel- und Niederspannungskabeln, BBR, 64(5): 16-21.

Stegner, J. (2010): Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Kapillarspannung, Ges. für Kommunikation (Hrsg.), Proc.: 31. Baugrundtagung - Forum für junge Geotechnik-Ingenieure, München, 181-185.

Stegner, J. (2009): Systematische Untersuchung des Zusammenhangs bodenmechanischer Kennwerte mit der Wärmeleitfähigkeit von Lockergesteinen, Unveröff. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt.

Stolzenburg, O. (2004): Die Vorteile des Einsatzes von Flüssigboden für das Rohr-Boden-System, Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg, Band 28, Vulkan-Verlag, Essen.

Su, C.; Brooks, R.H. (1975): Soil hydraulic properties from infiltration tests, Proc.; Watershed Management, Utah, 516-542.

- Tarnawski, V.R. (2000): Developing a temperature-dependent Kersten function for soil thermal conductivity, *International journal of energy research*, 24(15): 1335-1350.
- Taylor, G.S.; Luthin, J.N. (1969): Computer methods for transient analysis of water table aquifers, *Water Resources research*, 5(1): 144-152.
- Taylor, S. A.; Cavazza, L. (1954): The movement of soil moisture in response to temperature gradients, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 18(4): 351-258.
- TeKa (2015): TK04 Application Note – Messungen an Fragmenten und Pulvern, URL: www.te-ka.de. Geprüft: 13.01.2016.
- Terzaghi, K.; Peck, R.B. (1961): *Die Bodenmechanik in der Baupraxis* (Übersetzt von Bley, A.), Springer-Verlag, Berlin.
- Thoma, N. (2014): Geothermische und geotechnische Beurteilung von Bodenproben auf ihre Eignung zur Bettung erdverlegter Stromkabel, Unveröff. Bachelorarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- Trinks, S. (2010): Einfluss des Wasser- und Wärmehaushaltes von Böden auf den Betrieb von erdverlegten Energiekabeln. Technische Universität Berlin. Selbstverlag.
- Van Genuchten, M. (1980): A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5): 892-898.
- Van Rooyen, M.; Winterkom, H.F. (1957): Structural and textural influences on thermal conductivity of soils. Proc.: Thirty-Eighth Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington, 39: 576-621.
- VBI (Verband Beratender Ingenieure) (2012): *Leitfaden Oberflächennahe Geothermie*, Berlin.
- VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.) (1991): *Planung und Betrieb von städtischen Mittelspannungsnetzen*. VDEW-Verlag, Frankfurt a.M..
- VDI-GVC (Hrsg.) (2013): *VDI-Wärmeatlas*, 11. Auflage, Springer, Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Visser, W.C. (1968): An empirical expression for the desorption curve, Rijetma, P.E.; Wasink, H. (Hrsg.), Proc.: Wageningen Symposium, Paris, 1: 329-335.
- VKU (2012): VKU-Infografik-Netzebenen. URL: <http://www.vku.de/grafiken-statistiken/energie.html>. Geprüft: 15.12.2014.
- Vogler, M. (1999): Einfluß der Kapillarität auf die Mehrphasenströmung bei der Sanierung von Mineralölschadensfällen im Boden, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.

- Von Herzen, R.; Maxwell, E. A. (1959): The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method. J. Geophys. Res., 64: 1557-1563.
- Wind, G.P. (1968): Capillary conductivity data estimated by a simple method, Rijtema, R.E.; Wassink, H. (ed.): Water in the Unsaturated Zone, Proc.: UNESCO/IASH Symp., Wageningen, Netherlands: 181-191.
- Winkler, F. (1971): Der Einfluß des Bettungsmaterials auf die Belastbarkeit von Energiekabeln, ETZ-A 92: 131-137.
- Wolkersdorfer, Ch. (2008): Abriss der Hydrogeologie - Gesättigte und ungesättigte Zone, URL: http://www.wolkersdorfer.info/publication/pdf/hydro_1_04_LMU.pdf. Geprüft: 24.07.2015.
- Woodside, W.; Messmer, J. (1961a): Thermal conductivity of porous media I: Unconsolidated Sands. In: J. Appl. Phys., 32: 1688-1699.
- Woodside, W.; Messmer, J. (1961b): Thermal conductivity of porous media II: Consolidated Sands. In: J. Appl. Phys., 32: 1699-1706.
- Zhang, D (2009): Optimierung zwangsgekühlter Energiekabel durch dreidimensionale FEM-Simulationen, Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- Zhao, H.; Lyall, J. Nourbakhsh, G. (2000): Probabilistic cable rating based on cable thermal environment studying, Proceedings of Powercon 2000, International Conference on Power System Technology, Perth, W. A..
- Zunker, F. (1930): Das Verhalten des Bodens zum Wasser, Handbuch der Bodenlehre, 6, Springer, Berlin

ERKLÄRUNG ZUR DISSERTATION NACH §9 PROMO

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 03.03.2016

LEBENS LAUF

Ausbildung und berufliche Tätigkeit

2013 - 2016	Promotion, Graduate School of Excellence Energy Science and Engineering und Fachgebiet Angewandte Geothermie, Technische Universität Darmstadt
2009 - 2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachgebiet Ingenieurgeologie bis 2011, Fachgebiet Angewandte Geothermie bis 2015, Technische Universität Darmstadt
2002 - 2009	Studium Bauingenieurwesen, Technische Universität Darmstadt
2001 - 2002	Zivildienst, Psychiatrisches Krankenhaus Schloss Werneck
2000 - 2001	Malergeselle, Maler- und Verputzerbetrieb Werner Beck, Mellrichstadt
1999 - 2000	Berufsoberschule Würzburg
1998 - 1999	Berufsoberschule Bad Neustadt
1996 - 1998	Auszubildender zum Maler und Lackierer, Berufsschule, Maler- und Verputzerbetrieb Werner Beck, Mellrichstadt

Auszeichnungen

2014	Sieger Konzeptphase Science4Life Venture Cup
2014	1. Preis TU Darmstadt Businessplanwettbewerb
2013	3. Preis TU Darmstadt Ideenwettbewerb
2012	Elmar-Stenitzer-Preis
2011	Förderpreis der Darmstädter Stiftung für Technologietransfer
2011	2. Vortragspreis der Fachsektion Ingenieurgeologie der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik

ANHANG 1: KABELBELASTBARKEIT NACH DIN VDE 0276

Zur Veranschaulichung der Benutzung der Tabellen wird folgendes Beispiel betrachtet. Ein VPE-isoliertes Mittelspannungs-Kabel-System mit einer maximalen Betriebstemperatur am Leiter von 90 °C, ist in Böden verlegt, die die spezifischen Wärmewiderstände von 0,7; 1,0; 1,5 und 2,5 Km·W⁻¹ aufweisen. Die unbeeinflusste Bodentemperatur betrage 20 °C, der erwartete Belastungsgrad 0,7. Zudem ist im Abstand von 25 cm noch ein weiteres System im selben Kabelgraben verlegt, wobei beide Systeme eine Dreiecksanordnung und einen wirksamen Querschnitt des Aluminiumleiters von 150 mm² aufweisen.

In vier Schritten kann nun die gesuchte Belastbarkeit ermittelt werden:

1. Aus Tabelle 7 der VDE-Norm 0276-620 wird der Bemessungsstrom I_r des Kabels bei Normbedingungen bestimmt (Tabelle A1, Zeile 2).
2. Der Faktor f_1 für den Einfluss der Bodentemperatur unter Berücksichtigung des Bodenwärmewiderstandes und des Belastungsgrades wird der Tabelle 4 der Norm VDE 0276-1000 entnommen (Tabelle A1, Zeile 3).
3. Ebenso wird aus Tabelle 7 derselben Norm der Faktor f_2 für die Rückwirkung des benachbarten Kabelsystems im Abstand von 25 cm für die angegebenen Abweichungen von den Normbedingungen ermittelt (Tabelle A1, Zeile 4).
4. Multiplikation des Bemessungsstroms mit den beiden Faktoren f_1 und f_2 ergibt nun die zulässige Belastbarkeit des Kabels I_z (Tabelle A1, Zeile 5).

Tabelle A1: Berechnungsbeispiel für die Kabelbelastbarkeit

Spezifischer Wärmewiderstand des Bodens in Km·W ⁻¹	0,7	1	1,5	2,5
I_r in A	319			
f_1	1,12	1,00	0,90	0,81
f_2	0,89	0,89	0,90	0,91
I_z in A	317,98	283,91	258,39	235,13
Verhältnis I_z / I_r in %	99,68	89,00	81,00	73,71

Es muss demnach sichergestellt sein, dass die durch die Verteilung von elektrischer Energie auftretende Belastung im Kabel unterhalb der Belastbarkeit I_z bleibt. Ist dies nicht der Fall, so muss ein Kabel mit größerem Querschnitt gewählt werden. Dies bedeutet nach (Tabelle A1, Zeile 6), dass die Belastbarkeit des Kabels im Falle eines spezifischen Bodenwärmewiderstandes von 0,7 Km·W⁻¹ noch 99,68 % und im Falle eines Bodenwärmewiderstandes von 2,5 Km·W⁻¹ nur noch 73,71 % des Bemessungsstromes beträgt.

ANHANG 2: NATÜRLICHE LAGERUNGSDICHTE DER BÖDEN

Es wurden an verschiedenen Beprobungspunkten Rammsondierungen unweit der Entnahmepunkte mit der manuellen leichten Rammsonde (DPL-5, Künzelstab) nach DIN 4094-3 zur Ermittlung der Lagerungsdichte durchgeführt. Die leichte Rammsonde ist ein Handsondiergerät und geeignet für Sondiertiefen bis ca. 10 m. Sie ermöglicht eine vergleichende qualitative Beurteilung des Untergrunds über mehrere Horizonte hinweg.

Bei der leichten Rammsondierung wird der Eindringwiderstand einer Sondierspitze mit normtem Durchmesser gemessen, die mit einer definierten Rammenergie (Fallhöhe und Fallgewicht) in den Untergrund gerammt wird. Hierbei wird die Anzahl der Schläge des Fallgewichtes pro 10 cm Eindringtiefe mit definierter Fallhöhe gezählt. Die Sondierspitze ist auf einer Sondierstange von einem Meter Länge aufgeschraubt. Im Abstand von 10 cm ist den Sondierstangen eine umlaufende Nut eingeritzt. Die Stangen können durch Aufschrauben weiterer Stangen verlängert werden.

In den Ergebnisprotokollen (Abbildungen A2.1 und A2.2) wird auf der Abszisse die Anzahl der Schläge je 10 cm Eindringtiefe, auf der Ordinate die Eindringtiefe in Metern aufgetragen. Das Ergebnis, die benötigte Schlagzahl je 10 cm Eindringtiefe, ist eine Vergleichsgröße für die qualitative Lagerungsdichte des Bodens.

Die untersuchten Böden sind in natürlicher Lagerung in der Tiefe, in der Mittel- und Niederspannungskabel eingebaut werden (60 bis 70 cm), meist locker bis mitteldicht gelagert (Abbildungen A2.1 und A2.2). Die Lagerungsdichte nimmt ab ca. 1,50 m Tiefe zumeist zu. Schlagzahlen über 50 in geringen Tiefen sind auf Steine im Untergrund zurückzuführen. Für solche steinreichen Böden ist das Verfahren nicht zur Bestimmung der Lagerungsdichte des Bodens geeignet. Da die Wärmeleitfähigkeit mit der Verdichtung von Böden zunimmt, liegt ein Messwert direkt an den entnommenen Proben zumeist niedriger gegenüber verdichteten Böden in Kabelgräben.

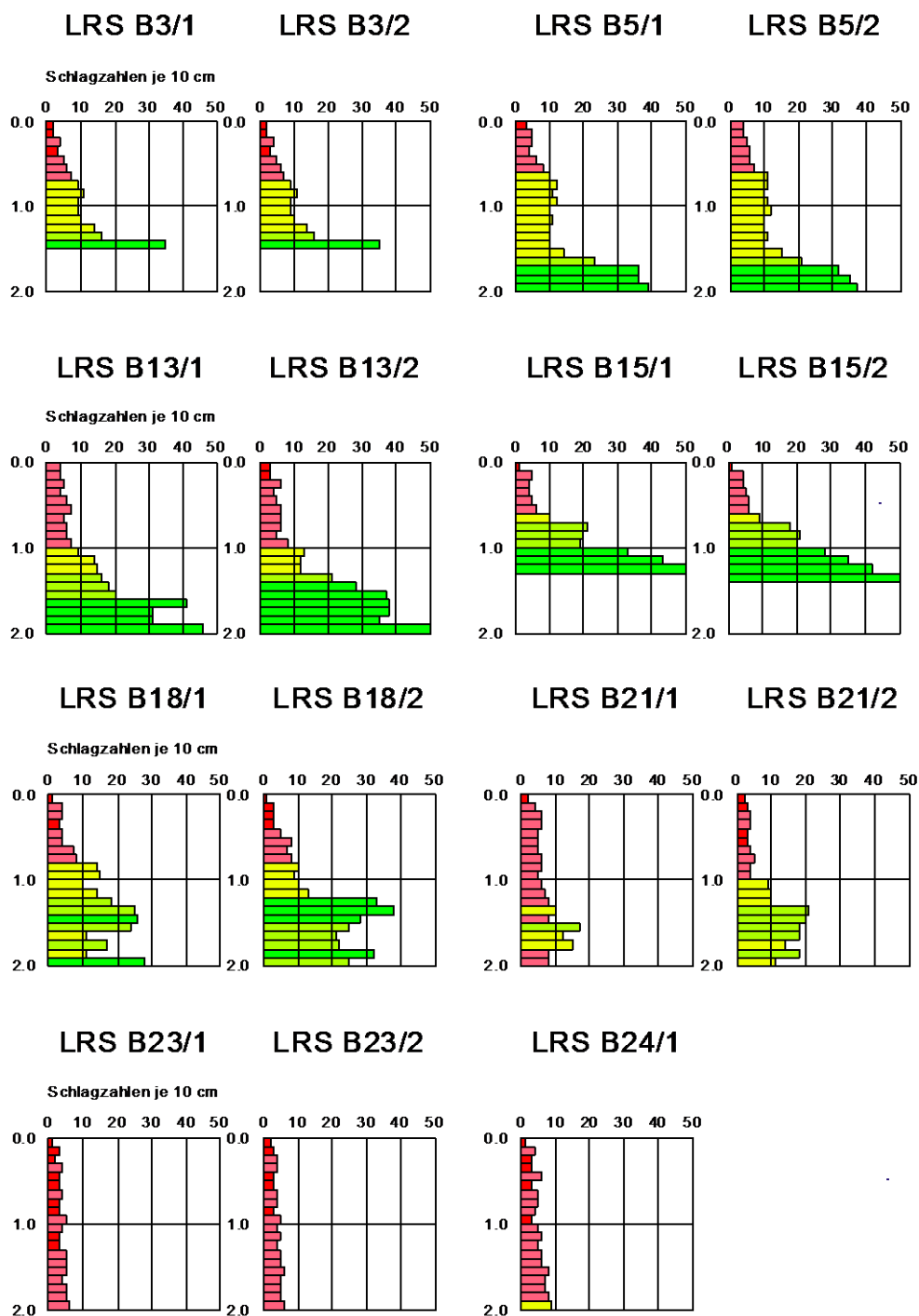
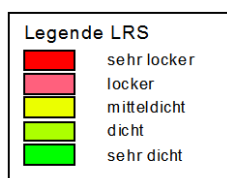


Abbildung A2.1: Auswertungen von Rammsondierungen mit der leichten Rammsonde bis in 2 m Tiefe (auf der Abszisse sind die Schlagzahlen je 10 cm Eindringtiefe und auf der Ordinate die zugehörigen Tiefenabschnitte in m aufgetragen)

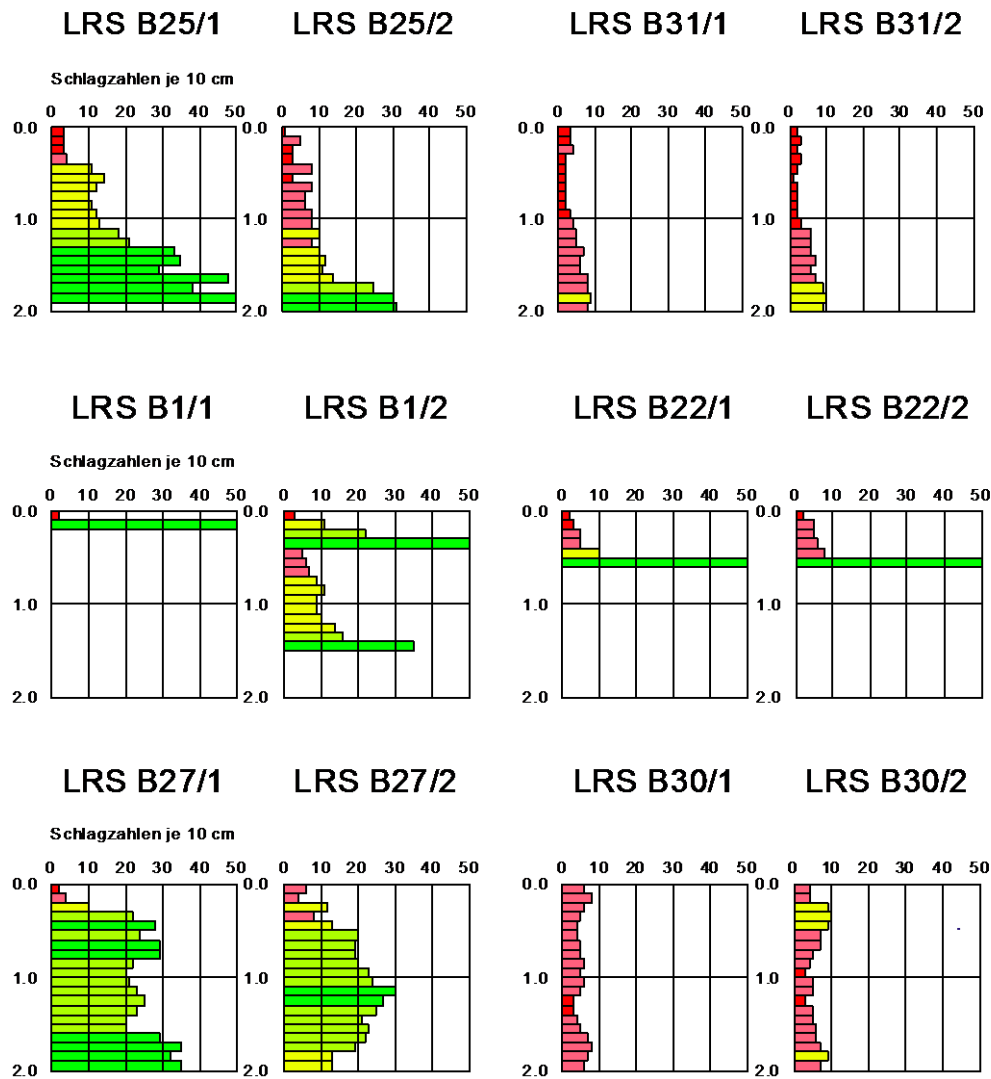
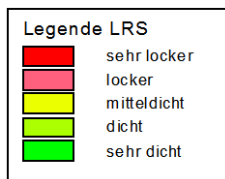


Abbildung A2.2: Auswertungen von Rammsondierungen mit der leichten Rammsonde bis in 2 m Tiefe

ANHANG 3: KENNWERTE VON KABELAUFBAUELEMENTEN

Zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften der Kabelmaterialien wurden Messungen der Wärmekapazität mit dem Differenzstrom-Kalorimeter C80 der KEP Technologies group, sowie Dichtemessungen mit dem Heliumpyknometer Accupyc 1330 der Micromeritics Instrument Corporation durchgeführt. Die Messungen wurden an den in dieser Arbeit verwendeten Mittelspannungskabeln NA2XS(F)2Y 1x150 RE/25 und Niederspannungskabeln NAY2Y-J SE 4x150 durchgeführt und mit den Materialkennwerten nach Herstellerangaben verglichen (Tabelle A3). Es ergaben sich keine gravierenden Differenzen zwischen Messwerten und Literatur-, bzw. Herstellerangaben.

Durchweg liegen die nichtmetallischen Elemente mit Wärmeleitfähigkeiten unterhalb von $0,5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ im niedrigen Bereich. Die metallischen Elemente besitzen im Vergleich hierzu sehr hohe Wärmeleitfähigkeiten. Kupfer als Handelsware weist Werte der Wärmeleitfähigkeit größer $240 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ und Aluminium größer $200 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf. Deswegen können sie in der Betrachtung der Wärmewiderstände, wie in Brakelmann, 1985 beschrieben, vernachlässigt werden.

Tabelle A3: Kennwerte der Kabelaufbauelemente von Mittel- und Niederspannungskabeln bei 25°C (Quelle: eigene Messwerte, Brugg GmbH, 2009 und Kern GmbH, 2014).

Material	Dichte ρ in kgm ⁻³	Spezifische Wärmekapa- zität c_p in Jg ⁻¹ K ⁻¹	Dichte ρ in kgm ⁻³	Spezifische Wärmekapa- zität c_p in Jg ⁻¹ K ⁻¹	Wärmeleitfä- higkeit λ in Wm ⁻¹ K ⁻¹	Wärmeaus- dehnungskoeffizient α in 10 ⁻⁶ K ⁻¹
	eigene Messungen		Herstellerangaben			
Mittelspannungskabel						
Aluminiumleiter	2,70	0,90	2,7	0,93	160	23,8
Vernetztes Polyethylen	0,90	2,64 (bei 40 °C)	0,91 - 0,97	2,4	0,29	170 (Wert von PE-LD)
Kupferschirm	7,05	0,38	8,9 (Kupferleiter)	0,39 (Kupferleiter)	380 (reines Kupfer)	16,2 (Kupferleiter)
Hochdichtes Polyethylen	0,94	2,12 (bei 40 °C)	0,94 - 0,97	1,9	0,42	200
Niederspannungskabel						
Aluminiumleiter	2,70	0,90	2,7	0,93	160	23,8
Polyvinylchlorid Isolierung	1,54	1,21	1,20 - 1,50	0,9 - 1,0	0,17	80
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk Füllmantel	1,91	1,16	0,8 - 1,3 (ohne Füllstoff)	-	0,1 - 0,3 (ohne Füllstoff)	-

Die mittels des Differenzstrom-Kalorimeters am Hydrothermikum des Instituts für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt gewonnenen Messwerte der temperaturabhängigen Wärmekapazitäten der Kabelaufbauelemente sind in Abbildung A3 dargestellt. Deutlich wird vor allem die starke Abhängigkeit der Wärmekapazität bei Polyethylen (PE-HD und VPE), namentlich der Isolierung und des Außenmantels. Diese Werte sollten ggfs. in weiteren FEM-Modellierungen berücksichtigt werden.

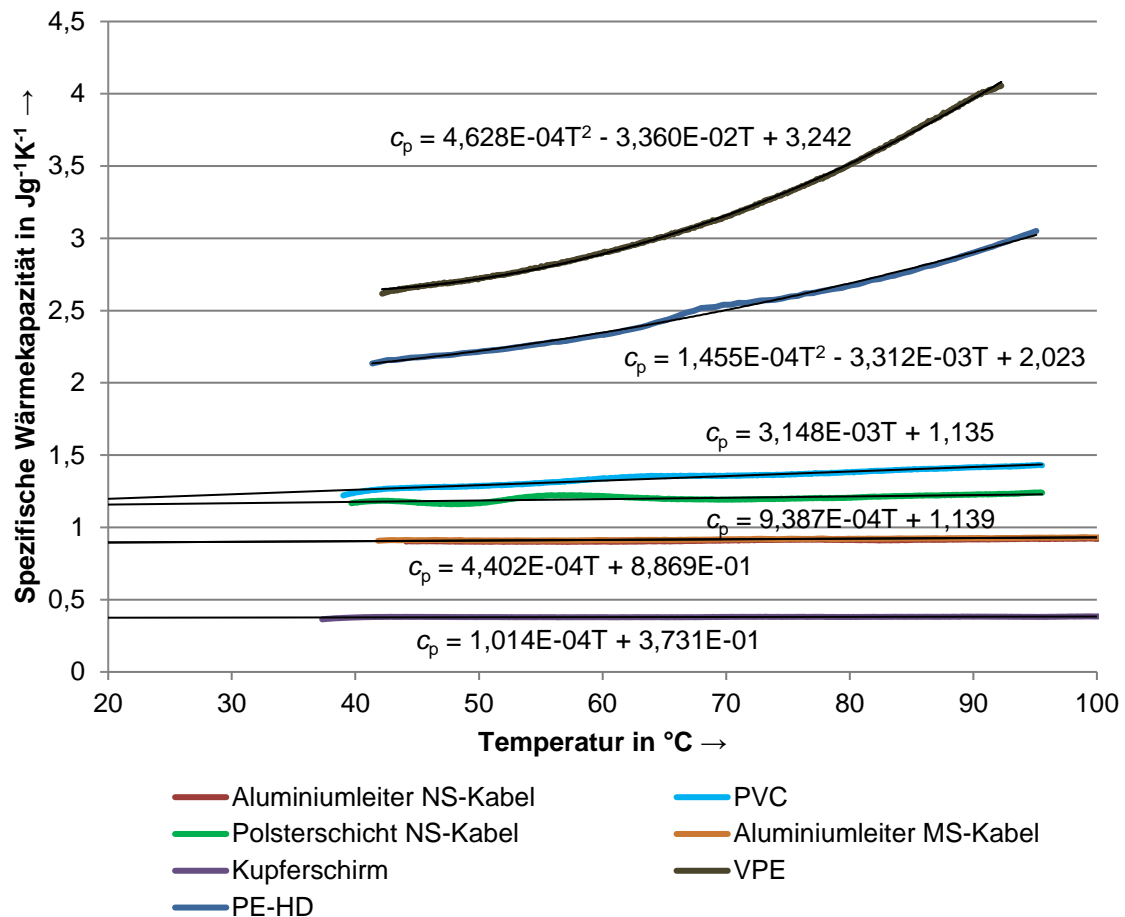


Abbildung A3: Wärmekapazitäten der Kabelaufbauelemente in Abhängigkeit der Temperatur

ANHANG 4: ARTEN VON KABELDEHNUNGEN IM BODEN

Für eine Abschätzung des Einflusses der temperaturbedingten *Längenausdehnung* des Kabels im Boden auf die Verformung wird als statisches Ersatzsystem ein Einfeldträger der Länge l mit gelenkigen Lagern verwendet. Im Boden wechseln sich aufgrund von Inhomogenitäten in der Verdichtung und des Bodens selbst Bereiche, die eine feste Einspannung und gelenkige bis verschiebbare Lager darstellen, ab, weswegen dieses statische Ersatzsystem (Abbildung A4.1) verwendet wird.

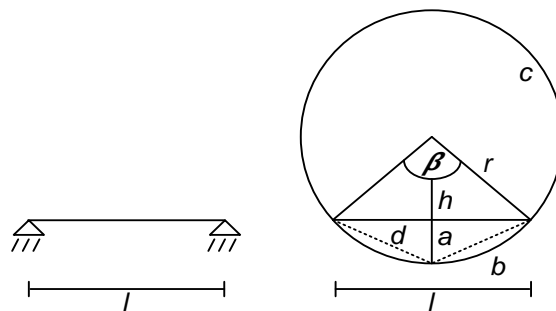


Abbildung A4.1: Ersatzanordnung zur Berechnung der Kabelausdehnung

Der thermische Ausdehnungskoeffizient des Aluminiumleiters beträgt $\alpha = 2,38 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$. Berechnet werden die Höhen des kleinen Kreissegmentes für verschiedene Längen bei einer Erwärmung um 70 °C , dabei sind:

- l Länge der Sehne (Länge des unbelasteten Aluminiumleiters)
- b Bogenlänge des kleinen Kreisabschnittes (Länge des Aluminiumleiters nach Erwärmung um 70 °C)
- a Höhe des kleinen Kreissegmentes
- β Mittelpunktswinkel der Sehne

Die Berechnung erfolgt über eine Approximation von α im Bogenmaß (Gleichung A4.1) und Einsetzen von Gleichung (A4.2) in (A4.3).

$$2b \cdot \sin \frac{\beta}{2} = \beta \cdot l \quad (\beta \text{ im Bogenmaß}) \quad (\text{A4.1})$$

$$r = \frac{b}{\beta} \quad (\text{A4.2})$$

$$a = \frac{2r - \sqrt{4r^2 - l^2}}{2} \quad (\text{A4.3})$$

Es ergibt sich ein linearer Anstieg der Höhe a des Kreissegmentes mit der Länge l :

$$l = 50 \text{ cm} \rightarrow a = 1,25 \text{ cm}$$

$$l = 100 \text{ cm} \rightarrow a = 2,5 \text{ cm}$$

$$l = 200 \text{ cm} \rightarrow a = 5 \text{ cm}.$$

Grundsätzlich bewirkt diese Längenausdehnung ein Anpressen des Kabels an den umgebenden Boden und damit eine Reduktion der Übergangswiderstände. Im Gegensatz zu Kabeln hohen Querschnittes mit Kupferleitern, die zumeist in eine Sandbettung gehüllt, werden Kabel mit Aluminiumleitern und geringeren Querschnitten regelmäßig ohne Bettung in den anstehenden Boden, also auch in bindige Böden eingebracht. Eine Verformung des Kabels kann dort zu einer dauerhaften Verformung des Bodens führen. Untersuchungen zur Ausdehnung von Kabeln in Rohren zeigen ein hierdurch hervorgerufenen „snaking“. Untersuchungen mit denen ermittelt werden soll, ob ein „snaking“ auch im Boden auftritt, befinden sich gerade im Anfangsstadium. Ausgeschlossen werden kann es in keinem der gezeigten Fälle. Hier werden in den kommenden Jahren genauere Aussagen erwartet. Möglicherweise können hierfür auch Daten mittels Georadarmessungen entlang von hochbelasteten Kabeltrassen gewonnen werden.

Für die temperaturbedingte *Querdehnung* der Kabel werden zwei Hauptfaktoren gesehen:

- direkte Wärmeausdehnung der Kabelaufbauelemente
- indirekte Querdehnung aufgrund behinderter axialer Dehnung bedingt durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten ($\alpha_{\text{PE-HD, VPE}} \sim 8 \cdot \alpha_{\text{Aluminium}}$)

Die Messung der Radialverformung wurde mit freien Kabelenden durchgeführt. Die Kabel wurden auf 14 cm Länge abgesägt, und die Enden wurden plangedreht. Es erfolgten Messungen der Kabeldurchmesser bei Raumtemperatur, anschließend jeweils Messungen bei 60 °C, 90 °C und nach der Abkühlung auf Raumtemperatur. Die Messungen erfolgten entlang von 2 Achsen über die ganze Kabellänge in 3 cm Schritten. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen A4.2 und A4.3 dargestellt.

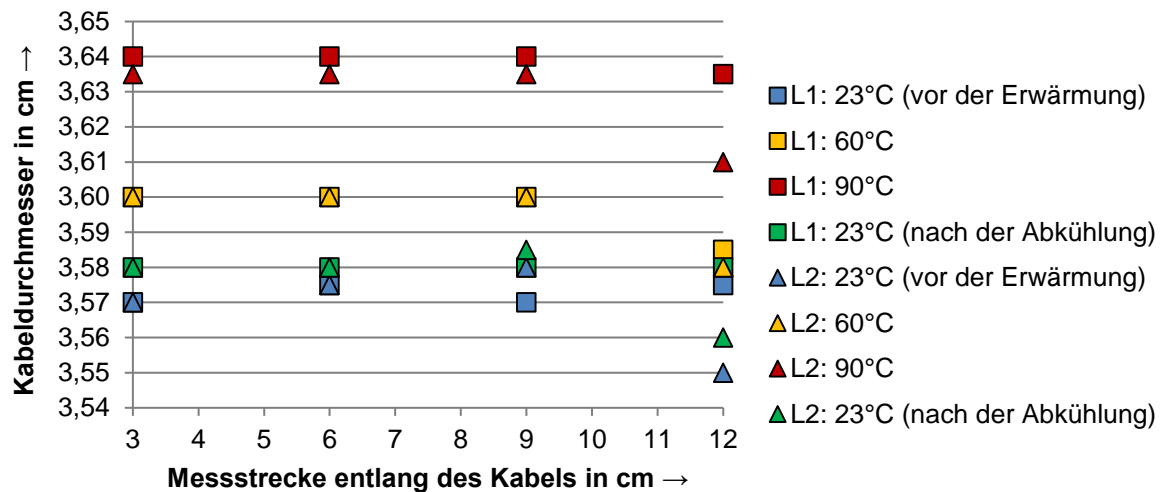


Abbildung A4.2: Kabeldurchmesser des Mittelspannungskabels NA2XS(F)2Y 1x150 RE/25 in Abhängigkeit der Temperatur

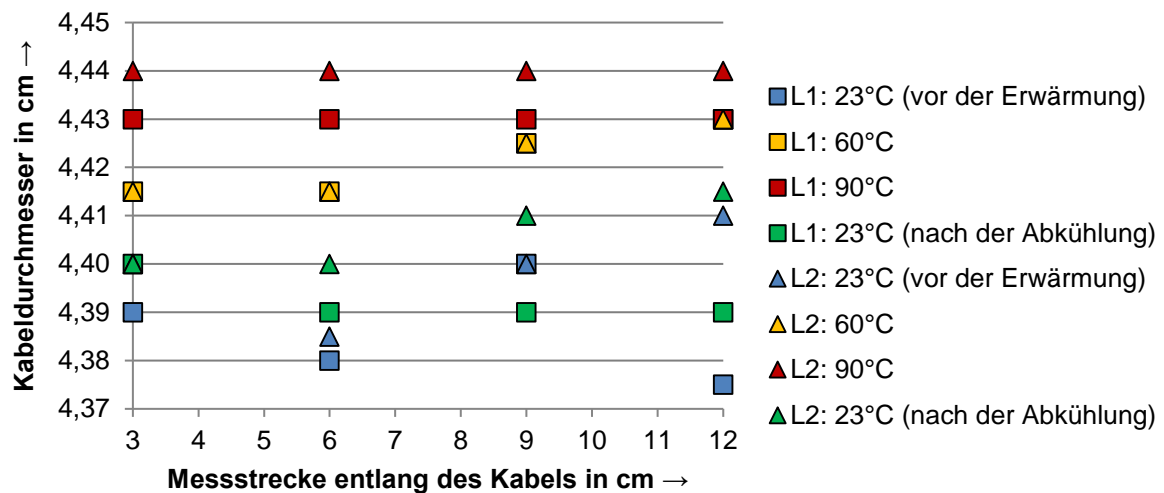


Abbildung A4.3: Kabeldurchmesser des Niederspannungskabels NAY2Y-J SE 4x150 in Abhängigkeit der Temperatur

Die Kabeldurchmesser d_{MS} und d_{NS} der im Kabeltestfeld (Abschnitt 7.1) verbauten Mittel- und Niederspannungskabel NA2XS(F)2Y 1x150 RE/25 und NAY2Y-J SE 4x150 können

aus den Messwerten für unterschiedliche Temperaturen nach den Gleichungen (A4.4 und A4.5) berechnet werden.

$$d_{\text{MS}} = 8,438 \cdot 10^{-4}T + 3,553 \quad (\text{A4.4})$$

$$d_{\text{NS}} = 5,961 \cdot 10^{-4}T + 4,383 \quad (\text{A4.5})$$

Die Änderungen im Durchmesser des Niederspannungskabels betragen nach diesem Versuch bei einer Erwärmung von 0 °C auf 70 °C (Frostgrenze und maximal erlaubte Leitertemperatur des Niederspannungskabels) durchschnittlich 0,4 mm. Da dieses Kabel einzeln und nicht in einer Dreieranordnung verlegt wird, ergibt sich kein Zwickelbereich von Boden und Kabel. Deswegen werden die Verformungen als vernachlässigbar im Boden eingestuft.

Die Änderungen der Durchmesser beim Mittelspannungskabel betragen bei einer Erwärmung von 0 °C auf 90 °C (Frostgrenze und maximal erlaubte Leitertemperatur des Mittelspannungskabels) durchschnittlich 0,76 mm. In Kombination mit der Dreieranordnung ergeben sich entlang der Achsen Dehnungen von 1,53 mm.

Die Mittelspannungskabel besitzen zudem im Vergleich zu Niederspannungskabeln wesentlich dickere Isolier- und Schutzschichten aus Kunststoff. Diese sind im Einzelnen eine 6 mm dicke VPE-Schicht sowie eine 3 mm dicke PE-HD-Schicht. Deren Längenausdehnung wird bei der Erwärmung auf die Längenausdehnung des Aluminiumleiters begrenzt. Dies kann zu einer Änderung des Durchmessers bei der Erwärmung von 0 °C auf 90 °C von bis zu 0,2 mm führen.

Insgesamt können die Querdehnungen des Kabels mit der Erwärmung aber als gering eingestuft werden. Sie können im Hochlastbetrieb zudem als positiv für den Kontakt zwischen Kabel und Boden gewertet werden. Eine Schrumpfung bzw. Spannungsreduktion führt nach der Abkühlung zu einer Erhöhung der thermischen Widerstände zwischen Kabel und Boden.

bei.